

学校代码:10363

学号: 2220110178



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 增材制造钛合金铣削试验 及加工机理研究

论文作者 朱益洋

指导教师 苏永生（副教授）

学科(专业) 机械

研 究 方 向 现代机械设计理论及方法

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号: TG506

密 级: 公开

单位代码: 10363

学 号: 2220110178

增材制造钛合金铣削试验及加工机理研究

EXPERIMENTAL STUDY AND MACHINING MECHANISM OF MILLING ADDITIVELY MANUFACTURED TITANIUM ALLOY

学 生 姓 名: 朱益洋
指 导 教 师: 苏永生 (副教授)
专 业: 机械
研 究 方 向: 现代机械设计理论及方法

论文答辩日期: 2025 年 5 月 13 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：朱益洋

日期：2025 年 5 月 20 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：朱益洋

指导教师签名：薛永生

日期：2025年5月20日

日期：2025年5月20日

增材制造钛合金铣削试验及加工机理研究

摘 要

随着航空航天、医疗器械、汽车和能源等行业对材料承载、耐热、耐腐蚀及轻量化等方面的要求不断提高,以增材制造钛合金为代表的难加工材料广泛应用于工业领域。然而,增材制造钛合金切削过程中的刀具快速磨损和加工质量恶化,严重制约了先进材料和高端构件的设计与应用。为提升其加工质量,本文针对增材制造钛合金 Ti6Al4V,选用不同结构的聚晶金刚石 PCD 刀具,在干式与二氧化碳低温润滑条件下,开展铣削试验研究,分析不同因素对其铣削性能的影响规律及其作用机理。主要研究内容包括:

(1) 通过单因素铣削试验,分析 PCD 常规刀具与 PCD 织构化刀具在不同铣削深度下的铣削力及表面黏结性能。结果显示,在低温 CO₂ 冷却润滑条件下,PCD 织构化刀具降低铣削力的效果最好,能够有效改善刀具表面黏结。

(2) 研究了 PCD 刀具和织构化刀具在不同进给量下的铣削力、刀具黏结、加工质量和切屑形态。结果显示,低温 CO₂ 不仅能够有效降低铣削力和铣槽底部粗糙度,而且可以显著改善不同类型刀具表面黏结;随着进给速度的增加,产生的切屑宏观形态呈增大且断续的较短切屑。

(3) 开展不同进给量条件下 PCDR 刀具铣削试验,并与 PCD 刀具铣削试验结果进行对比分析。结果显示,与 PCD 常规刀具相比,

在干式条件下，PCDR 刀具的铣削合力显著低于 PCD 刀具，槽底表面质量更优，而在低温 CO₂ 冷却润滑下，PCDR 刀具铣削合力不仅增大，且槽底表面出现裂纹与凹坑；随着进给量的增加，PCDR 刀具铣削后的切屑从卷曲长条状逐渐转变成更加紧密的 C 型螺旋状。

关键词：增材制造钛合金，PCD 刀具，织构化，铣削力，低温冷却

EXPERIMENTAL STUDY AND MACHINING MECHANISM OF MILLING ADDITIVELY MANUFACTURED TITANIUM ALLOY

ABSTRACT

With the increasing demands placed on materials in terms of load-bearing capacity, heat resistance, corrosion resistance, and lightweight performance in aerospace, medical device, automotive, and energy industries, difficult-to-machine materials, represented by additive manufactured titanium alloys, have been widely employed in industrial applications. However, rapid tool wear and deteriorated machining quality during the cutting of additive manufactured titanium alloys have become major constraints limiting the design and application of advanced materials and high-end components. To improve the machining quality of such materials, additive manufactured Ti6Al4V was selected in this study, and milling experiments were carried out using polycrystalline diamond (PCD) tools with various structural configurations under both dry cutting and cryogenic CO₂ lubrication conditions. The influence patterns and underlying mechanisms of various factors affecting milling performance were systematically investigated. The main research contents are as follows:

- (1) Single-factor milling experiments were performed to analyze the

cutting forces and surface adhesion behavior of conventional PCD tools and textured PCD tools at different milling depths. The results indicated that, under cryogenic CO₂ cooling and lubrication conditions, the textured PCD tools achieved the most significant reduction in cutting force and effectively improved the anti-adhesion performance of the tool surface.

(2) The effects of feed rate on cutting force, tool adhesion, machined surface quality, and chip morphology were investigated for both conventional and textured PCD tools. The results demonstrated that cryogenic CO₂ cooling not only effectively reduced the cutting forces and the roughness at the groove bottom, but also significantly improved the anti-adhesion properties of different types of tools. As the feed rate increased, the chips tended to become larger, more fragmented, and shorter in morphology.

(3) Milling experiments were conducted using PCDR tools under various feed rate conditions and comparatively analyzed with the results obtained from conventional PCD tools. The findings showed that, under dry cutting conditions, the milling forces generated by PCDR tools were significantly lower than those of conventional PCD tools, and better surface quality at the groove bottom was achieved. However, under cryogenic CO₂ cooling and lubrication, increased milling forces were observed along with the formation of cracks and pits on the groove-bottom surface. Moreover, as the feed rate increased, the chips

produced by the PCDR tools gradually transformed from long, curled strips into more compact C-shaped spirals.

KEY WORDS: additive manufacturing titanium alloy, PCD tool, textured, milling force, cryogenic cooling

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
插图清单	IX
插表清单	XI
第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 冷却润滑介质对切削特性影响	2
1.2.2 增材制造钛合金切削特性分析	4
1.2.3 刀具织构化对切削特性的影响	6
1.2.4 刀具几何参数对切削特性影响	8
1.2.5 课题研究现状总结及研究目的	10
1.3 本文主要研究内容及章节安排	11
第 2 章 增材制造钛合金铣削试验设计	13
2.1 PCD 织构刀具铣削方案	13
2.1.1 试验方案设计	13
2.1.2 试验材料与设备	14
2.2 PCD 常规刀具铣削方案	17
2.2.1 试验方案设计	17
2.2.2 试验设备及现场	18
2.3 铣削力特点及数据处理	19
2.3.1 铣削力信号特点	19
2.3.2 力信号处理方法	20
2.4 本章小结	22
第 3 章 PCD 织构刀具低温铣削试验	24
3.1 不同铣削深度下低温铣削试验	24
3.1.1 铣削力信号对比分析	24

3.1.2 刀具织构化对主铣削力的影响	26
3.1.3 低温冷却润滑对主铣削力的影响	27
3.1.4 不同条件下织构化刀具合力分析	29
3.1.5 低温下的刀具表面黏结情况分析	30
3.2 不同进给量下低温铣削试验	31
3.2.1 低温对刀具铣削力的影响	31
3.2.2 织构对刀具铣削力的影响	33
3.2.3 不同条件下铣削合力分析	35
3.2.4 刀具织构化对粗糙度影响	35
3.2.5 刀具表面黏结情况分析	40
3.2.6 表面硬度和切屑形态分析	41
3.3 铣削力机理讨论和分析	43
3.4 本章小结	45
第 4 章 PCD 常规刀具低温铣削试验	46
4.1 不同润滑条件下铣削力分析	46
4.1.1 PCDR 干式和低温下铣削力分析	46
4.1.2 PCD 和 PCDR 干式下铣削力分析	47
4.1.3 PCD 和 PCDR 低温下铣削力分析	48
4.2 不同润滑条件下表面粗糙度分析	49
4.2.1 不同润滑下粗糙度和形貌分析	49
4.2.2 刀具前角对表面粗糙度的影响	52
4.3 低温对 PCDR 刀具表面黏结的影响	54
4.4 干式下增材制造钛合金切屑形态分析	55
4.5 铣削力机理讨论和分析	55
4.6 本章小结	56
第 5 章 总结与展望	58
5.1 全文总结	58
5.2 研究展望	59
参考文献	60

攻读学位期间取得的成果及参研项目	68
致谢	69

插图清单

图 1-1	不同冷却条件对工件表面粗糙度值 S_a 的影响与部分表面形貌 ^[35]	3
图 1-2	切屑轮廓 ^[40]	5
图 1-3	不同切削方式下的刀具磨损 ^[55]	7
图 2-1	增材制造钛合金试件.....	14
图 2-2	织构刀具尺寸参数.....	15
图 2-3	低温铣削试验现场.....	16
图 2-4	电子布氏硬度计.....	16
图 2-5	试件硬度测量.....	17
图 2-6	试验设备及现场.....	18
图 2-7	光学 3D 表面轮廓仪.....	19
图 2-8	铣削力信号及信号放大图.....	20
图 2-9	力信号图.....	21
图 2-10	铣削区间选取.....	21
图 2-11	寻峰与输出结果.....	22
图 3-1	低温润滑下的常规和织构刀具铣削力信号.....	25
图 3-2	低温润滑下的常规和织构刀具铣削力信号放大对比.....	26
图 3-3	PCD 织构刀具干式条件下的主铣削力.....	27
图 3-4	PCD 织构刀具低温条件下的主铣削力.....	27
图 3-5	PCD 刀具干式和低温下的主铣削力.....	28
图 3-6	PCD 织构刀具干式和低温下的主铣削力.....	28
图 3-7	不同条件下不同刀具主铣削力和铣削合力对比.....	29
图 3-8	不同条件下刀具表面黏结及 EDX 分析.....	30
图 3-9	不同润滑条件下 PCD 刀具铣削力.....	32
图 3-10	不同润滑条件下 PCD 织构刀具铣削力.....	33
图 3-11	干式下不同刀具铣削力.....	34
图 3-12	低温下不同刀具铣削力.....	34
图 3-13	不同条件下的合力.....	35

图 3-14	干式下表面粗糙度	36
图 3-15	低温下表面粗糙度	37
图 3-16	不同条件下表面质量对比($f_z=0.02$ mm/z)	38
图 3-17	不同条件下表面质量对比($f_z=0.04$ mm/z)	39
图 3-18	刀具表面黏结	40
图 3-19	不同工件表面硬度对比和分析	41
图 3-20	增材制造钛合金干铣削切屑形貌分析	42
图 3-21	刀具织构化低温铣削机理	44
图 4-1	PCDR 干式和低温铣削力对比	46
图 4-2	PCD 和 PCDR 干式铣削力对比	48
图 4-3	PCD 和 PCDR 低温铣削力对比	49
图 4-4	不同润滑条件下粗糙度	50
图 4-5	干式铣槽电镜形貌图	51
图 4-6	低温铣槽电镜形貌图	52
图 4-7	粗糙度对比	53
图 4-8	PCDR 刀具表面黏结情况	54
图 4-9	干式下切屑形态分析	55

插表清单

表 2-1	铣削参数	13
表 2-2	试验方案与铣削参数	14
表 2-3	激光增材制备参数	14
表 2-4	刀具几何参数	15
表 2-5	刀具织构参数	16
表 2-6	硬度测量数据	17
表 2-7	PCDR 刀具参数	17
表 2-8	PCDR 刀具切削参数	17
表 3-1	PCD 刀具铣削力	32
表 3-2	PCD 织构化刀具铣削力	33
表 3-3	刀具铣削合力	35
表 3-4	干铣削下槽底粗糙度	36
表 3-5	低温铣削下槽底粗糙度	37
表 4-1	PCDR 铣削力数据	47
表 4-2	PCDR+干式下表面粗糙度	49
表 4-3	PCDR+低温下表面粗糙度	50

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

随着航空、航天、能源及交通运输等关键领域对材料承载、耐热、轻量化和可靠性等方面的要求不断提高，以钛合金为代表的金属增材制造(Additive manufacturing, AM)材料及其复杂构件的应用越发广泛^[1]。据统计，2022 年仅航空工业领域的钛材用量，全球和国内分别占比近 50%和 23%，并在飞机结构件、航空发动机结构件以及航空紧固件等领域占有极其重要的地位。在航空飞行方面，由增材制造技术制造的轻量化零件不仅可使有效载荷显著提高，而且可以大幅度减少发射太空飞行器的费用^[2]。在医疗器械方面，根据不同患者的身体状况，可利用增材制造技术制造出钛合金的个性化植入物来满足患者的各种需求^[3]。在汽车制造方面，增材制造技术成型的零部件不仅提高了汽车发动机的性能，还能减轻轴承等重量，这些改善使汽车油耗得到很大提升^[4]。

与传统减材制造方法相比，增材制造技术具有如下优势：设计自由度高，可制造复杂几何形状构件；材料利用率高，减少浪费；快速制造与缩短产品生成周期；小批量生产和定制化制造；降低成本^[5-7]。然而，相比于传统锻件材料，增材制造钛合金通常具有更高的硬度、屈服强度、极限抗拉强度、表面粗糙度及残余应力^[8]，存在加工精度低、表面质量差、表面变形及机械性能控制难等问题^[9-10]，难以满足高使役性和高可靠性要求，金属切削加工为增材制造钛合金及关键构件后处理加工提供了一种重要的解决途径。

目前，延长刀具寿命、降低刀具磨损和提高切削效率是实现难加工材料高效切削的重要指标，主要手段如以下几个方面：

(1) 超硬刀具的选择，如聚晶金刚石(PCD)刀具、立方氮化硼(CBN)刀具、陶瓷刀具以及硬质合金刀具等^[11-14]。

(2) 刀具表面涂层，如氮化钛(TiN)涂层、碳氮化钛(TiCN)涂层、氮化钛铝(TiAlN)涂层、铝钛氮(AlTiN)涂层、类金刚石碳(DLC)涂层、氮化铬(CrN)涂层以及 TiN/TiCN/TiAlN 多层涂层的应用^[15-21]。

(3) 刀具结构、几何参数及切削工艺优化^[22-23]。

(4) 切削表界面不同冷却润滑方式的应用，如高压射流、微量润滑、低温微

量润滑、静电雾化微量润滑和液氮及纳米流体等不同冷却润滑方法^[24-28]。

(5) 在刀具表面设计制备出一定规则分布的微米织构、纳米织构或微纳复合织构等几何特征^[29-30]。

以往学者们在钛合金切削加工领域已进行大量的试验研究,然而,目前国内学者对于增材制造钛合金的研究主要集中在力学性能和组织性能研究,而对于增材制造钛合金的切削特性及刀具摩擦磨损研究,目前涉足较少。因此,开展增材制造钛合金的切削加工,改善切削性能、降低切削摩擦、提高加工效率及加工质量对推动金属增材制造钛合金及其高端构件的设计与应用具有重要的研究意义及应用价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 冷却润滑介质对切削特性影响

传统机械加工中广泛使用液体作为冷却剂,虽然能够显著降低切削区域的温度,但是该方式存在冷却效率提升空间有限、环境污染较大以及刀具耐用性不足等问题。最新研究证实,采用液氮、二氧化碳等低温介质的新型冷却方案不仅能更精准地控制切削温度,而且可有效延长刀具使用寿命并提升工件表面光洁度。采用这类低温冷却润滑技术逐渐成为学术界关注重点。

戎杰等^[31]通过对比干式切削与水基微量润滑(Water-based minimum quantity lubrication, WMQL)两种条件下切削参数对钛合金加工特性的影响规律发现,相较于无润滑状态,WMQL工艺对切削载荷的优化作用较为有限,而采用油膜附水滴微量润滑(Oil-on-water minimum quantity lubrication, OoWMQL)技术则在不同加工参数下均实现了切削力的显著下降。而且OoWMQL工艺在改善表面质量方面效果突出,不仅降低了表面粗糙度,还有效减少了表面划伤与切屑黏附等缺陷的形成。Munish等^[32]研究了不同冷却机制对钛合金加工的影响,重点分析了刀具磨损、表面形貌、切削比能量和切削温度等因素。结果表明,混合液氮(LN₂)+微量润滑(Minimal quantity lubrication, MQL)显著提高了刀具寿命和表面质量,并且混合冷却条件有助于减少钛合金加工过程中的比切削能。Pei等^[33]对增材制造GH4169合金进行了不同低温气体射流流动参数的铣削实验。结果表明,低温

气体喷射冷却显著提高了刀具寿命和加工表面粗糙度。赵香港等^[34]通过实施液态二氧化碳冷却切削实验，探究了其降温特性对 PCD 刀具加工轴承套圈磨损行为的影响规律。实验数据表明，采用二氧化碳低温冷却工艺后，加工区域的温度、工件表面粗糙度值以及刀具磨损均得到有效控制，并且该冷却方式可显著抑制 PCD 刀具在轴承套圈硬态车削过程中的磨损速率。李小睿等^[35]选用聚晶立方氮化硼(PCBN)刀具开展 GCr15 轴承套圈硬态高速车削实验，通过与高压乳化液冷却及干式高速切削的对比研究，揭示了不同冷却方式与工艺参数对刀具损耗及工件表面完整性的作用机制。实验数据表明，在特定切削参数范围内，采用高压 CO₂ 低温射流辅助工艺可有效控制刀具损耗并改善切屑形态。特别是在较高切削速度工况下，该冷却策略不仅对提升表面质量具有显著效果，而且能够有效降低表面粗糙度、增加残余压应力和表层显微组织硬度。如图 1-1 所示。

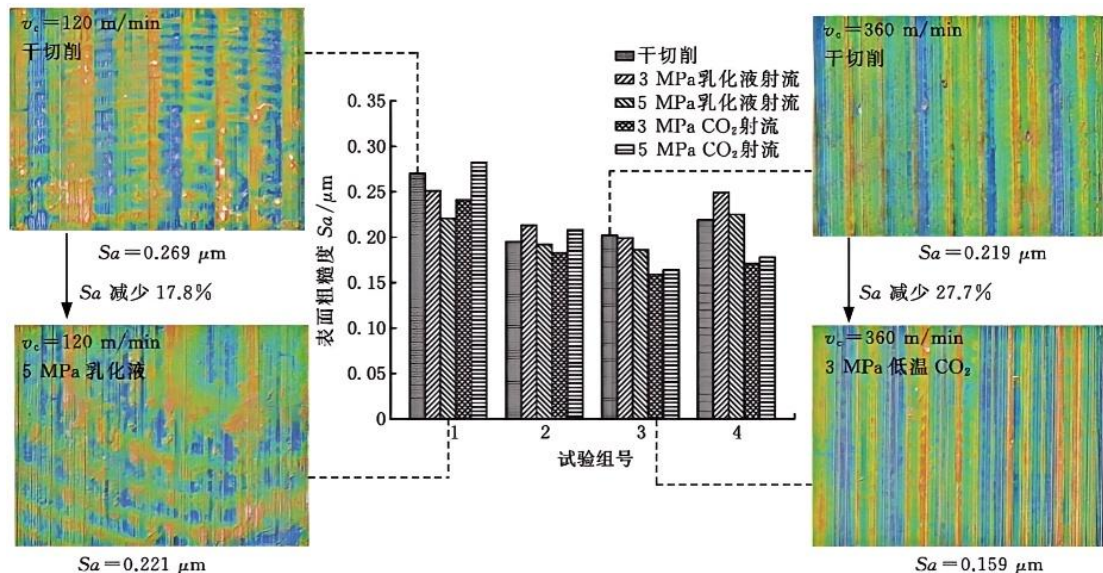


图 1-1 不同冷却条件对工件表面粗糙度值 Sa 的影响与部分表面形貌^[35]

吴世雄等^[36]通过对比液氮低温冷却与干式切削条件下淬硬钢的高速加工特性，发现虽然采用液氮冷却可使切削区域温度下降 6.90-9.90%，但是由于冷却作用导致工件材料发生硬化效应，从而使得切削过程中的切削载荷较干切削增加了 10.10-12.80%。An 等^[37]通过瞬态传热试验和钛合金切削实验，评估了冷雾喷射 (Cold mist jet, CMJ)、冷空气喷射、泛冷和微量润滑剂的冷却效果。结果显示，与其他冷却方法相比，高临界热通量 (Critical heat flux, CHF) 的 CMJ 具有更强的冷却能力，显著降低了钛合金高速切削时的切削温度，同时提高了刀具寿命和表面质量。Zhao 等^[38]针对 Ti6Al4V 合金的低温铣削试验，研究了液氮冷却条件下

铣削力的变化规律及表面完整性。结果表明, 喷射温度在 20--196°C 变化时, 铣削力急剧增加, 表面粗糙度下降, 在切削速度为 90 m/min 和切削深度为 30 μm 时, 最小显微硬度也出现下降。Roland 等^[39]进行低温复合超声辅助车削、传统车削、低温车削和超声波辅助车削对比试验, 验证了复合切削在降低切削力和减少刀具磨损方面的有效性。结果显示, 复合切削不仅减少了刀具磨损, 还使刀具和切削温度分别降低了 7.26%和 13.86%, 相比传统车削, 切削力降低了 22.00%。

1.2.2 增材制造钛合金切削特性分析

相比传统工艺制备的钛合金, 基于增材制造技术成形的钛合金受其特殊成形方式和多尺度组织特征影响, 表现出明显差异的力学行为。具体表现为内部残余应力积聚明显、各向异性以及显微硬度呈非均匀分布等典型特征, 这些特征显著增加了切削工艺的实施难度, 突出反映在刀具快速钝化现象、动态切削载荷异常提升以及已加工表面形貌控制失效等棘手问题上。因此, 为实现增材制造钛合金的高效切削, 改善加工效率、提高表面质量并延长刀具寿命, 国内外学者从刀具磨损机制、切削参数优化、冷却润滑技术、刀具材料选择以及多种提高加工效果的方法和理论模型等方面, 展开了深入研究。

Jiang 等^[40]为探讨激光选区熔化钛合金在超高速区域的材料去除机制, 开发了单点划痕(Single-point scratching, SPS)系统, 并研究了从 20 m/s 到 220 m/s 速度范围内的材料去除机制以及对表面形成、表层下微观结构和切屑形成进行了系统分析。结果显示, 在较高速度下, 堆积效应明显抑制。在 220 m/s 的速度下, 塑性变形仅限于深度在 1 μm 以内的表层, 如图 1-2 所示。除此之外, 随着划痕速度的增加, 切屑去除模式逐渐由连续切屑转变为分段切屑, 并最终转变为碎屑。Chen 等^[41]从铣削力、表面质量、顶毛刺和加工硬化等方面, 综合比较了激光选区熔化(Selective laser melting, SLM) TC4 热处理前后的各向异性机加工性能。结果表明, SLMed TC4 材料顶面的铣削力和加工硬化度均大于侧面, 且顶面的表面质量更好, 顶毛刺更小, 表现出明显的各向异性。经过热处理后, SLMed TC4 材料不同表面之间的各向异性加工性能显著降低。Jafarian 等^[42]研究 AM Ti6Al4V 低温加工过程中的可加工性, 以及刀具几何参数对加工性能的影响, 结果显示, 刀刃前角从 0° 增大到 20° 会增大切削力, 刀尖半径从 0.4 mm 增大到 1.2 mm 会

增大切削温度。Khatri 等^[43]通过有限元分析建立单点金刚石加工(Single point diamond machining, SPDM)增材制造钛合金模型,揭示一种独特的切屑去除模式。结果显示,在较低的进给速度下,出现了短而不连续的切屑形成,外围有撕裂现象,在较高的进给速度下,可观察到长而连续的带状切屑形成。

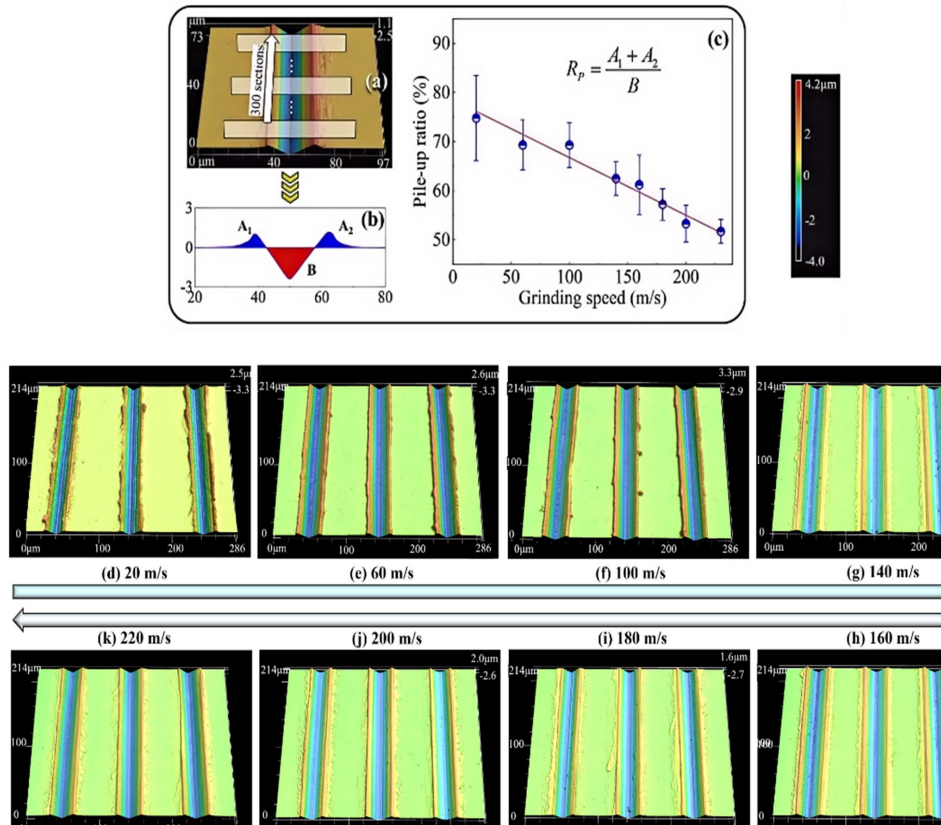


图 1-2 切屑轮廓^[40]

(a) 提取 300 个截面以生成平均截面轮廓; (b) 平均截面轮廓; (c) 速度对堆积比的影响 (R_p 是 $A_1 + A_2$ 与 B 面积之比); (d-k) 以不同加工速度加工的划痕的三维表面形态以及相应的截面轮廓

Danish 等^[44]研究了增材制造 Ti6Al4V 在干切削、微量润滑、低温二氧化碳 (CO_2) 以及 MQL 和 CO_2 混合条件下的切削特性。结果显示,与其他策略相比, MQL 混合 CO_2 条件下的刀具磨损较低,加工表面粗糙度得到显著改善。Aslantas 等^[45]研究了增材制造 Ti6Al4V 合金在微铣削时的切削力、刀具磨损、表面粗糙度和毛刺变化。结果显示,干切削和冷空气切削条件下的切削力最大,而在 MQL 条件下,随着切削距离的增加,切削力几乎保持不变。在 MQL 条件下,刀具磨损最小,并观察到锯齿状毛刺的形成,而在其他切削条件下则观察到叶状毛刺的形成。Zhang 等^[46]研究了在干式高速铣削过程中使用固体陶瓷刀具对增材制造 Ti6Al4V 的切削响应,分析了切削力和切削温度场与加工参数之间的关系。结果

显示,进给速度对切削力和温度场的影响大于切削速度。Wu 等^[47]建立了微铣表面粗糙度理论模型,并使用 PCD 微型立铣刀对增材制造钛合金进行了微铣实验。铣削表面不同横向位置的表面粗糙度测量结果表明,铣削表面实际粗糙度与理论粗糙度之间的差值主要由不稳定的切削行为引起。

Li 等^[48]通过改变进给速度,采用干切削和微量润滑辅助切削工艺,在一定切削速度下对激光粉末床熔融(Laser powder bed fusion, L-PBF)成型的 Ti6Al4V 试样进行铣削加工,并比较分析了不同加工工艺下试样的表面质量、切削力、刀具磨损和切屑形状。结果显示,与干切削条件相比, MQL 辅助切削工艺显著降低了加工过程中的切削力和刀具磨损程度。在进给速度为 20 mm/min 时,孔结构的加工质量最好,毛刺较少,平均尺寸误差仅为 77 μm 。Airao 等^[49]对 SLM Ti6Al4V 与锻造 Ti6Al4V 进行了微车削对比试验,研究了其表面特征、刀具磨损和切屑形态。结果显示,两种材料的主要刀具磨损机理包括边缘堆积、附着、磨损和边缘崩裂。表面粗糙度随着切削速度和进给量的增加而增加。锻造 Ti6Al4V 生成的切屑长且连续,而 SLM Ti6Al4V 生成的切屑则不连续。Ni 等^[50]研究了增材制造 Ti6Al4V 的材料各向异性对超精密微机械加工性能的影响。结果显示, Ti6Al4V 合金的各向异性、机械性能和微观结构特征是切削力和表面粗糙度等各向异性加工性能的根本原因。SLM Ti6Al4V 合金的加工性能受到微观结构、加工表面、切削方向和切削参数的影响。

1.2.3 刀具织构化对切削特性的影响

在钛基合金等难切削材料的机械加工中,普遍存在切削载荷过高、热积累显著及界面摩擦剧烈等问题,这些问题直接导致刀具快速失效与加工表面完整性劣化。为提高切削加工效率、延长刀具寿命以及改善工件表面质量,近年来,借鉴材料科学与表面工程领域中仿生摩擦学研究成果,国内外专家在刀具表面引入表面织构,改善其与工件间的相互作用,并就织构化刀具在难加工金属切削中的应用,展开了一系列的深入研究。

周云等^[51]通过 6061 铝合金湿式切削实验,探究了刀具不同区域表面织构对刀-屑界面摩擦特性的影响规律。结果表明,采用左右对称凹坑与平行沟槽组合的复合织构刀具展现出更优异的加工性能,并且合理的复合织构方案能显著改善

刀具切削过程中的黏结磨损问题，从而延长刀具寿命。方锐等^[52]针对 304 不锈钢车削试验，设计了一种结合微织构技术与超声振动的创新车削方案。试验结果显示，与常规刀具相比，微织构刀具可将主切削力降低 30.00-40.00%。李媛媛等^[53]通过有限元分析探讨了微织构对 6061 铝合金切削性能的影响。结果表明，刀具的微织构特征能够减小刀-屑界面的摩擦，从而降低摩擦热和切削温度。叶艳秋等^[54]在刀具前刀面上制备了三种不同类型的微织构，并进行了润滑状态下的摩擦磨损试验。结果显示，沟槽、宽网格和窄网格的硬质合金平均摩擦因数均小于原始表面的硬质合金平均摩擦因数，且具有窄网格织构的硬质合金在润滑条件下表现出最强的抗磨损能力。张硕等^[55]将微织构刀具应用于椭圆超声辅助切削试验，发现微织构刀具能够进一步改善切削性能，并且微织构的角度和尺寸也会影响刀具的抗磨损效果，如图 1-3 所示。

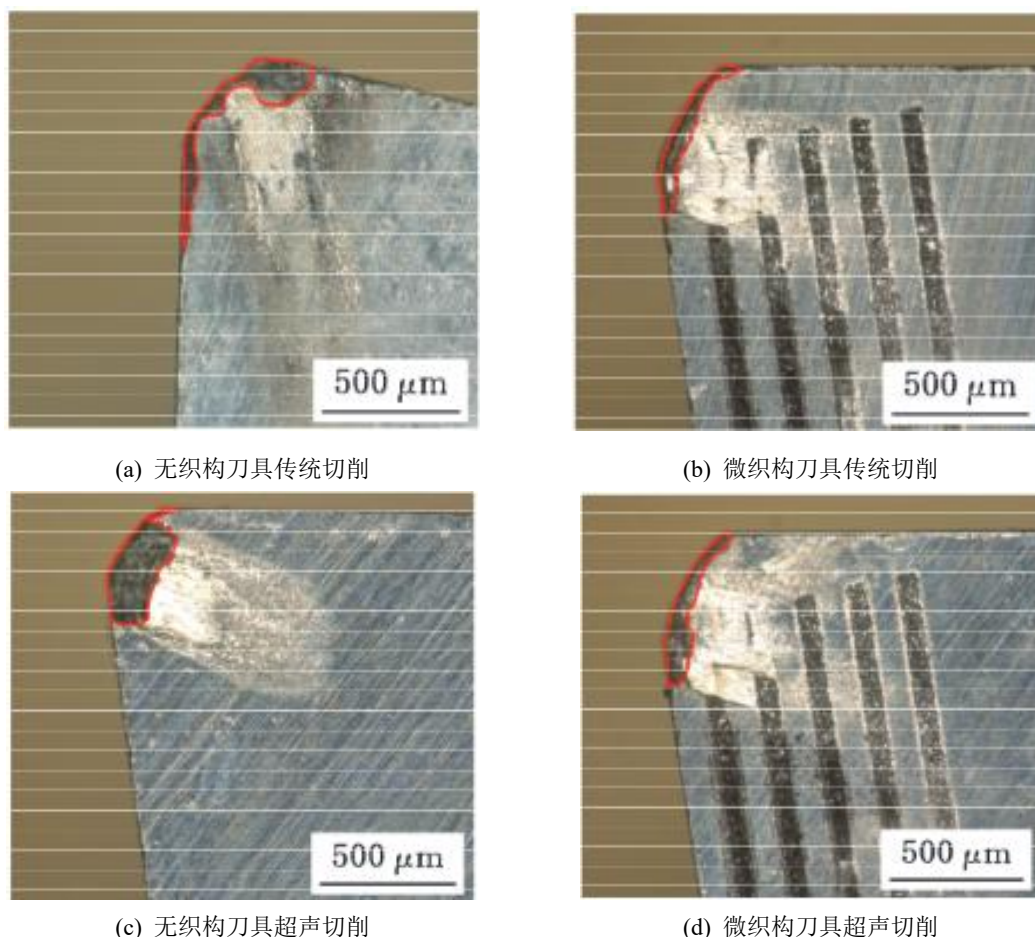


图 1-3 不同切削方式下的刀具磨损^[55]

周慧琳等^[56]采用织构刀具对铝合金材料进行切削性能研究，发现干切削条件下，当织构宽度超过 30 μm 时，刀具的表面织构效果变差；而在切削液条件下，

刀具表面的微/纳织构能够改善切削效果，并降低刀具切削力。陈德雄等^[57]构建了热-力耦合仿真模型，研究了不同微织构刀具和微织构几何参数等因素对刀具成屑行为的影响。结果表明，微织构刀具有利于断屑，增加切削速度有助于提高各类刀具的断屑效果。其中弧形微织构刀具的降温效果最佳。Pawanr 等^[58]研究了凹陷织构在 AZ31B 镁合金干式加工中的作用，重点分析了其对刀具磨损和切屑形态的影响。结果显示，切削速度是影响刀具侧面磨损的主要因素，其次是进给量和切削深度。低切削速度下切屑呈不连续形态，而高速切削时切屑则为连续形态。Li 等^[59]研究了在相同切削参数下，涂层复合微织构刀具对切屑形状和切削力的影响。结果显示，使用复合微织构刀具时，切屑更容易断裂。与无微织构刀具相比，切削力降低了 25.00%，切削温度降低了 9.09%。与未涂层的复合微结构刀具相比，切削温度和切削力分别降低了 3.00%和 4.99%。Maeng 等^[60]研究了在超声椭圆振动切削(Ultrasonic elliptical vibration cutting, UEVC)条件下，使用织构聚晶金刚石 PCD 刀具加工模具材料时的切削性能和刀具磨损情况，并在超精密机床上进行了有 UEVC 和无 UEVC 的正交切削实验。结果表明，UEVC 加工可以显著降低切削力和推力，提高刀具寿命。使用 PCD 织构化刀具加工钢基合金时，切削效果未得到改善，但与 UEVC 结合使用时，切削效果有所提升。王栋梁等^[61]在前刀面和后刀面上分别制备了圆孔和直槽混合微织构，并在 38CrMoAl 氮化钢上进行切削实验。结果显示，随着切削速度的增加，前后刀面混合微织构刀具的切削温度最大值和切削力均小于无织构刀具。

1.2.4 刀具几何参数对切削特性影响

刀具的几何参数是切削加工中决定刀具性能的重要因素，通常包括前角、后角、主偏角、切削刃角度、刀尖半径等。这些参数直接影响刀具与工件的接触情况，进而影响切削力、切削温度、刀具磨损、切屑排出及加工表面质量。研究刀具几何参数对于提高切削加工效率、延长刀具寿命、降低生产成本及优化加工质量具有重要作用。

Ireneusz^[62]研究了加工参数对粗干铣削后三维表面粗糙度的影响，采用具有可变前角和螺旋角的硬质合金立铣刀对 AZ31B 镁合金试样进行实验。结果表明，粗铣削试样的表面粗糙度主要受刀具几何形状和加工参数的影响。当使用前角为

5°、螺旋角为 50° 的刀具进行铣削时，能够获得较低的表面粗糙度值。杨晋宁^[63]采用正交试验，对四个刀具几何参数对切削力和切削温度的影响进行有限元仿真，寻求最优铣削方案。结果表明，最优铣削方案的刀具几何参数为：齿数为 2，径向前角为 15°，螺旋角为 20°，切削刃钝圆半径为 0.03 mm。唐海权等^[64]基于层次分析法和熵权法对各评价指标进行组合赋权，结合逼近理想解排序法和灰色关联法，对刃口参数进行优化。结果显示，当刃口参数为前角 10°、倒棱角度 10°、倒棱长度 0.15 mm 时，刀具具有较好的切削性能。李捷等^[65]建立了极端特殊环境下切削刀具关键参数标准化的工艺路线与方法，并根据加工产品的表面粗糙度和效率间接评估刀具的有效使用寿命和质量可靠性。结果显示，刀具使用较大后角时，刃口更加锋利，能减少后刀面与已加工表面的摩擦，从而有利于降低表面粗糙度值；而较大的刀尖圆弧半径有助于提升刀具的有效加工次数。胡春林^[66]以高强度钢 30CrNi2MoVA 为测试对象，分析了纵扭超声振动辅助铣削的参数优化。结果显示，后角 10°、前角 2°、螺旋角 40°、切刃半径 0.01 mm 为最优参数组合。王贵林等^[67]基于铲钻倒棱刃口的几何关系，提出了一种考虑铲钻倒棱角度和宽度的钻削力理论模型，并采用有限元仿真进行铲钻钻削力测试实验。结果显示，设计铲钻刀具倒棱刃口时，倒棱宽度选择 0.1 mm，倒棱角度选择 10° 或 30° 可获得较低的钻削力。

骆迎昕等^[68]研究了工艺参数对 CFRP 加工温度及次表面损伤的影响，进行了 6 种纤维切削角(Fiber cutting angle, FCA)下的直角切削试验，并测量了切削温度。结果表明，前角的增加可以减小刀具的挤压作用，从而减小切削力和表面温度；在纤维切削角 θ 为 90° 时，前角和后角的增加能有效抑制次表面损伤的出现；在 120° 时，前角增大会导致次表面纤维弯折角减小，纤维断裂损伤明显增加；在 150° 时，前角和后角的增加均能有效减少次表面损伤的产生。Rodriguez 等^[69]评估了基于环保型液态二氧化碳(LCO₂)的冷却/润滑条件和聚晶金刚石钻头几何形状（刀尖角）对 CFRP 复合材料钻孔分层的影响。结果表明，与改变冷却条件相比，刀具几何参数的变化对 CFRP 钻孔表面完整性有更大影响，且刀尖角较小的刀具能够产生较小的切屑厚度。陈良骥等^[70]为了减小 7075-T651 铝合金工件的加工变形、提高金属去除率，并降低铣削力和铣削热，基于铣削有限元仿真模型，通过多目标优化算法获得了较低铣削力和铣削温度以及较高金属去除率的铣削

参数。优化结果显示,刀具几何参数为前角 17.95° 、后角 2.00° 时,铣削力为 232.12 N, 铣削温度为 22.56°C , 金属去除率为 $33.08\text{ mm}^3/\text{min}$ 。Pereszalai 等^[71]为了比较碳纤维和玻璃纤维增强聚合物(CFRP 和 GFRP)复合材料的倾斜螺旋铣削工艺,使用无涂层硬质合金立铣刀对 CFRP 和 GFRP 复合材料进行了多次倾斜螺旋铣削实验,分析了倾斜角度和螺旋刀具路径间距对轴向切削力的影响。结果显示,螺旋刀具路径的间距对 z 方向切削力分量的影响最大,其次是倾斜角。马廉洁等^[72]采用不同几何参数的 YG6 刀具进行氧化锆陶瓷车削实验,根据单因素试验值建立了切削力和刀具利用率与刀具几何参数的关系模型,并分析整合出多元模型。随后,根据正交试验值进行优化求解,最终得到一组优化后的刀具几何参数。结果显示,最优刀具几何参数为:前角 -5° 、后角 19° 、刀尖圆弧半径 1.1 mm,此时刀具利用率为 90.8,切削力为 23.6 N。

1.2.5 课题研究现状总结及研究目的

综合已有研究成果,在难加工材料切削加工领域,冷却润滑、刀具结构设计以及几何参数优化在提升切削性能方面取得了一定的进展,但对于增材制造钛合金这一特殊组织特征材料,其切削加工中仍存在以下问题:

(1) 冷却润滑技术在金属切削加工领域,尤其是针对钛合金等难加工材料中,已被广泛证实能够有效降低切削温度、延缓刀具磨损并提升加工表面质量。然而,针对增材制造钛合金的相关研究尚不系统,特别是在低温冷却条件下,其切削特性、热-力耦合行为及加工表面响应等方面的实验研究仍较为稀缺,缺乏对刀具磨损机制和表面完整性变化规律的深入解析。

(2) 刀具几何参数(如前角、后角、螺旋角等)对切削力、切屑成形、磨损行为和表面质量的影响已得到广泛关注,但由于增材制造钛合金具有显著的各向异性、残余应力和微观缺陷,其对刀具几何形貌更为敏感,加工过程中表现出更为复杂的响应机制,目前在该领域仍缺乏系统性的实验验证与理论支撑。

(3) 在刀具表面设计制备出一定规则分布的微米织构、纳米织构或微纳复合织构等几何特征,结合不同类型润滑介质或者冷却润滑方式,在减摩、抗黏结及加工质量方面的效果明显优于相同条件的常规刀具。然而,随着切削参数、加工材料及刀具材料等方面的进一步设计与应用,以及越来越高的加工要求,现有刀

具结构化能否应用在增材制造钛合金等难加工材料方面,提高切削性能,实现更好的减摩效果,已逐渐成为刀具结构化切削研究的新热点。

综上所述,本文以增材制造钛合金为研究对象,开展系统的铣削试验,通过控制和对比不同刀具前角参数,分析其对切削力、刀具磨损行为及加工表面质量的影响机制,旨在揭示不同加工条件下的铣削特性以及作用机理,为推动增材制造钛合金高效切削研究的发展提供参考。

1.3 本文主要研究内容及章节安排

诸如以上研究存在的问题,为促进增材制造钛合金切削加工体系研究与发展,本课题针对增材制造钛合金 Ti6Al4V 进行铣削试验,选择聚晶金刚石 PCD 常规刀具、PCD 结构化刀具和前角 16° PCD(PCDR)刀具作为刀具材料,开展干式以及低温 CO_2 冷却润滑条件下不同刀具的切削力、表面粗糙度、刀具表面黏结等以及作用机理研究。具体章节内容安排如下:

第 1 章:绪论。介绍论文的研究背景及意义,指出相对于传统锻造钛合金而言,增材制造钛合金的优势和目前存在的问题。提出论文的研究主题,并就本课题相关领域的国内外研究现状进行了梳理。

第 2 章:增材制造钛合金铣削方案。本章内容详细制定了后续所开展的试验方案:以干式和低温 CO_2 冷却润滑作为介质条件,选用 PCD 常规刀具、PCD 结构化刀具和 PCDR 刀具,改变铣削参数(铣削深度、每齿进给量),制定铣削试验方案。详细阐述了力信号数据的处理方法,同时分析了试验中铣削力信号的特点。

第 3 章:PCD 结构刀具低温铣削试验。本章内容分为以下两个内容模块:

(1) 不同铣削深度下低温铣削试验

本试验采用 PCD 常规刀具和 PCD 结构化刀具,在干式铣削和低温二氧化碳冷却润滑条件下,开展不同铣削深度下增材制造钛合金铣削试验,研究刀具结构化和低温冷却的协同作用对铣削力、和刀具表面黏结的影响。

(2) 不同进给量下低温铣削试验

采用 PCD 常规刀具和 PCD 结构化刀具,分别在干式和低温 CO_2 润滑条件下,开展不同进给量下增材制造钛合金铣削试验,探究刀具结构化复合低温冷却对铣

削力、加工质量和刀具表面黏结的影响机制，并对上述试验结果作出机理分析。

第 4 章：PCD 常规刀具低温铣削试验。本章主要目的是采用 PCDR 刀具作为刀具材料，分别在干式和低温二氧化碳条件下，开展不同进给量下增材制造钛合金铣削试验，并与上述 PCD 刀具铣削试验结果进行对比研究，探究刀具几何参数（前角）在不同条件下的影响规律。

第 5 章：总结与展望。本章对本文所有试验的结果进行了归纳和总结，并指出本文所存在的不足之处，对后续相关研究做出展望。

第 2 章 增材制造钛合金铣削试验设计

为探究刀具结构化、低温二氧化碳冷却润滑介质以及刀具前角参数对增材制造钛合金铣削加工性能的影响机制，本章基于单因素试验设计方法，开展增材制造钛合金铣削试验研究。设计了 PCD 结构化刀具低温铣削试验和 PCD 常规刀具低温铣削试验，根据不同的试验条件分别设计了不同的铣削试验方案，以及详述和分析试验中所获取的铣削力信号特点和处理方法。

2.1 PCD 织构刀具铣削方案

2.1.1 试验方案设计

为确保试验结果具有代表性与可比性，本文在设计试验参数时充分参考了相关文献中的典型加工范围以及增材制造钛合金材料的力学性能特点^[73]。若铣削参数设置过高，易引发刀具严重磨损和工件表面损伤，而参数设置过低，则可能导致铣削力信号微弱、材料去除效率偏低，不利于分析其真实加工行为。因此，结合现有加工研究经验及预实验结果，制定如下铣削方案：

试验 1：本试验设计铣削深度在 0.25-0.45 mm 范围内，转速和每齿进给量保持一定，开展增材制造钛合金干式和低温二氧化碳铣削对比试验。试验分为 4 种组合条件，分别为 PCD 常规刀具+干式铣削、PCD 结构化刀具+干式铣削、PCD 常规刀具+低温 CO₂ 铣削以及 PCD 结构化刀具+低温 CO₂ 铣削，每种组合条件进行 3 次试验，分别在铣削深度 0.25 mm、0.35 mm 和 0.45 mm 下进行，具体试验结果及分析见第 3 章第 1 节。铣削参数如表 2-1 所示。

表 2-1 铣削参数

试验序号	转速(r/min)	每齿进给量 (mm/z)	进给速度(mm/min)	铣削深度 a_p (mm)
1	6000	0.02	240	0.25
2				0.35
3				0.45

其中，进给速度计算如下：

$$v_f = f_z \times z \times n \quad (2-1)$$

式中， v_f 为进给速度，单位为 m/min； f_z 为每齿进给量，单位为 mm/z； z 为

齿数； n 为转速，单位为 r/min 。

试验 2：基于试验 1 中的 4 种试验组合条件，仅改变每齿进给量在 0.01-0.04 mm/z 范围内，转速与铣削深度均保持不变。每种组合条件进行 4 次试验，分别在铣削深度 0.01 mm/z、0.02 mm/z、0.03 mm/z 和 0.04 mm/z 下进行，具体试验结果及分析见第 3 章第 2 节。具体试验方案及铣削参数如表 2-2 所示。

表 2-2 试验方案与铣削参数

加工方式	每齿进给量(mm/z)	进给速度(mm/min)	转速(r/min)	铣削深度(mm)
PCD+干铣削				
PCD+低温铣削				
PCD 织构+干铣削	0.01、0.02、0.03、0.04	120、240、360、480	6000	0.35
PCD 织构+低温铣削				

2.1.2 试验材料与设备

钛合金试件由激光(SLM)增材制造工艺制备，如图 2-1(a)所示，激光增材制备工艺参数如表 2-3 所示。激光增材制备后，经过退火热处理，然后线切割，最后进行喷砂处理，如图 2-1(b)所示。



(a) 激光制备试件



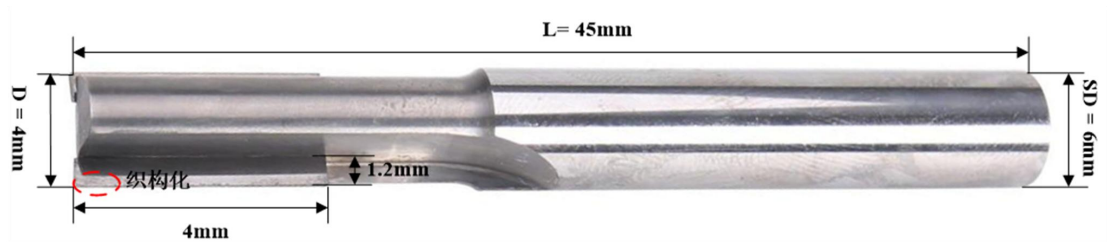
(b) 处理后试件

图 2-1 增材制造钛合金试件

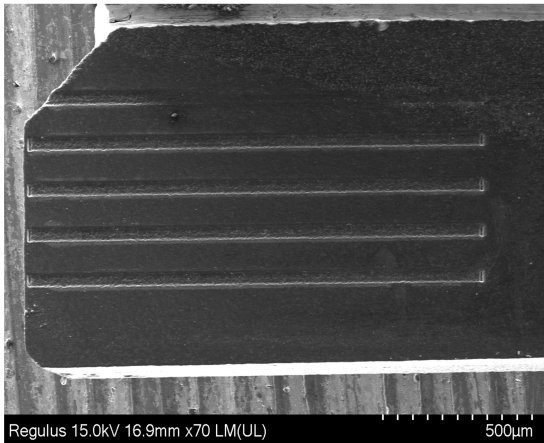
表 2-3 激光增材制备参数

功率	速度	层厚	扫描间距	光纤激光波长
340 W	1260 mm/s	0.06 mm	0.12 mm	1064 nm

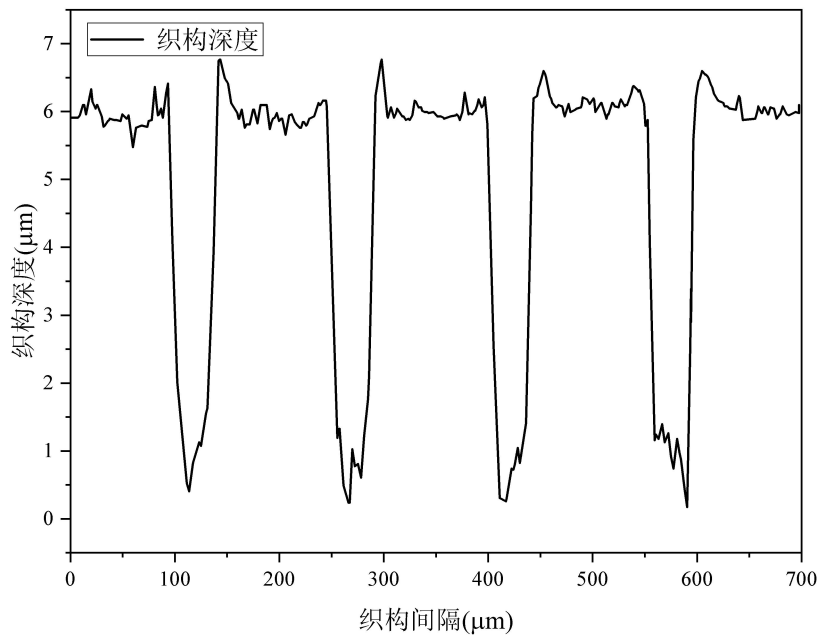
试验所用刀具为同规格双直刃的 PCD 刀具以及 PCD 织构化刀具，图 2-2(a)、(b)和(c)分别为刀具结构参数、织构化 SEM 形貌以及织构深度形貌，刀具具体几何参数如表 2-4 所示。



(a) PCD 刀具结构参数



(b) 织构化 SEM 形貌



(c) 织构深度形貌

图 2-2 织构刀具尺寸参数

表 2-4 刀具几何参数

刀具类型	刃径	前角	后角
PCD 两刃刀具	4 mm	0°	15°

刀具表面微织构采用飞秒激光系统 COHERENT 制备，其织构参数如表 2-5 所示。试验中刀具表面黏结形貌由扫描电子显微镜拍摄，型号为 HITACHI Regulus 8220。低温试验现场如图 2-3 所示。

表 2-5 刀具织构参数

织构深度	织构宽度	织构间隔	织构距离侧刃距离
7 μm	40 μm	100 μm	250 μm

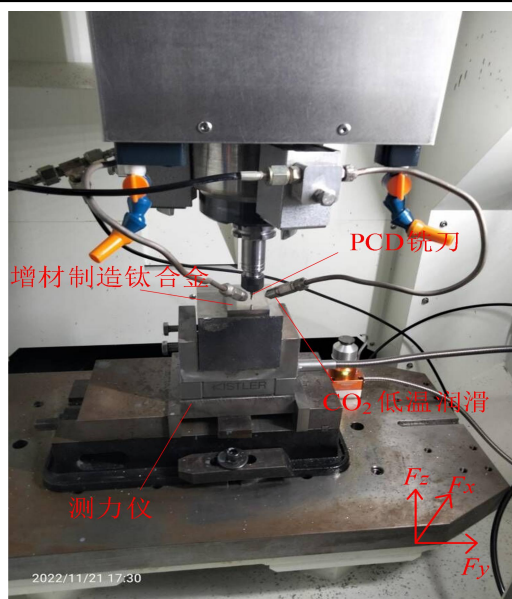


图 2-3 低温铣削试验现场

试验中对增材制造钛合金进行硬度测量,测量设备为上海比目仪器有限公司的电子布氏硬度计,型号为 200HB-3000,如图 2-4 所示。电子布氏硬度计通过静态压入法,压头球压入增材制造钛合金试件表面,施加一定载荷并保持一定时间,使材料充分变形。卸除载荷后,读取实验力数据,并通过布氏硬度测量显微镜测量压痕直径,并通过查表确定压痕直径对应的布氏硬度。本试验中共进行 8 次硬度测量,如图 2-5 所示,测量数据如表 2-6 所示。试验中铣削槽底部表面粗糙度的测量设备为三维非接触式表面形貌仪(NANOVEA PS50)。



图 2-4 电子布氏硬度计

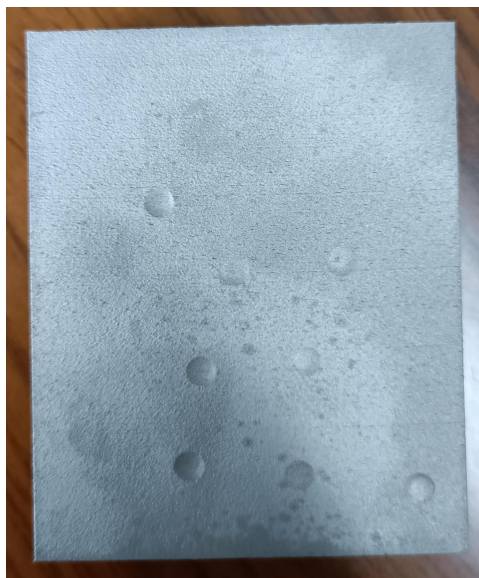


图 2-5 试件硬度测量

表 2-6 硬度测量数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8
压痕直径(mm)	3.45	3.38	3.50	3.46	3.43	3.47	3.41	3.48
布氏硬度(HBW)	311	325	302	309	315	307	319	306

2.2 PCD 常规刀具铣削方案

2.2.1 试验方案设计

本节内容主要针对增材制造钛合金 TC4 材料,采用前角 16° 的 PCD(PCDR) 刀具作为刀具材料,分别进行干式和低温 CO_2 铣削试验,并与第三章前角为 0° 、双直刃的 PCD 刀具铣削试验结果进行对比与分析,具体试验内容分析见第 4 章。PCDR 刀具具体参数如表 2-6 所示。

表 2-7 PCDR 刀具参数

刃数	柄径	刃径	柄长	刃长	前角	后角
双刃	6 mm	4 mm	50 mm	6 mm	16°	10°

试验分为两组,分别为 PCDR+干式和 PCDR+低温 CO_2 ,仅改变每齿进给量 0.01-0.04 mm/z,其他切削参数保持一致,具体参数如表 2-7 所示。

表 2-8 PCDR 刀具切削参数

	PCDR+干式	PCDR+低温
每齿进给量(mm/z)	0.01、0.02、0.03、0.04	
进给速度(mm/min)	120、240、360、480	
转速(r/min)	6000	
铣削深度(mm)	0.35	

2.2.2 试验设备及现场

本试验铣床型号为 MAKINO S1m3n，测力仪型号为 Kistler LabAmp Type 5167A。图 2-6(a)-(d)分别为干式铣削试验现场、低温铣削试验现场、CO₂ 低温冷却装置以及力信号采集现场。



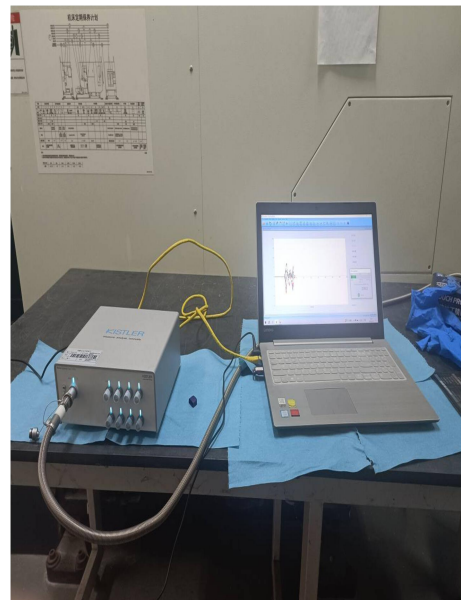
(a) 干式铣削现场



(b) 低温铣削现场



(c) 低温 CO₂ 冷却装置



(d) 力信号采集现场

图 2-6 试验设备及现场

本试验中测量铣槽底部表面粗糙度的仪器为光学 3D 表面轮廓仪，如图 2-7 所示。



图 2-7 光学 3D 表面轮廓仪

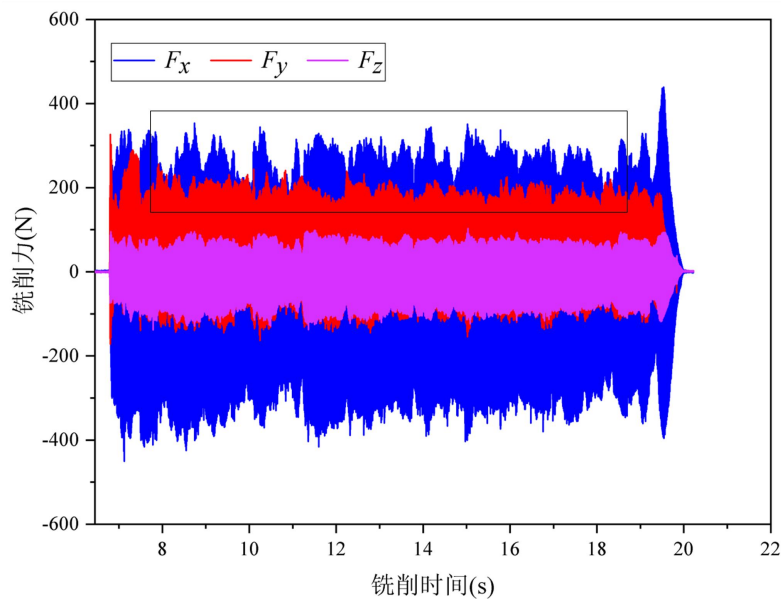
2.3 铣削力特点及数据处理

2.3.1 铣削力信号特点

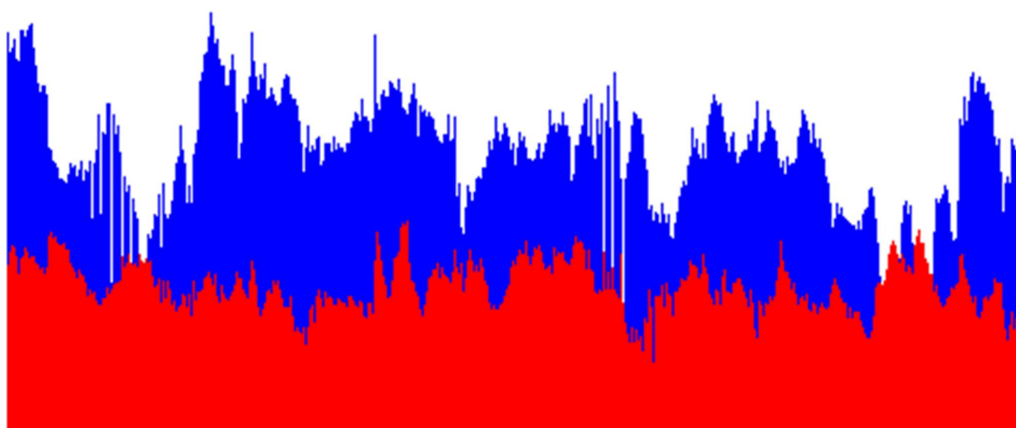
切削力信号是指在机械加工（如铣削、车削、钻削等）过程中，刀具与工件相互作用产生的动态力的测量数据。这些信号通常通过传感器采集，用于分析加工状态、优化工艺参数、监测刀具磨损或预测加工质量。

图 2-8 为增材制造钛合金铣削力信号图，从图 2-8(a)中可分析出，整个铣削过程中的力信号整体上呈周期性变化，上下波动较为平稳。在铣削初期， x 、 y 和 z 三个方向的力信号出现明显的突增状态，这归因于铣刀-工件刚进入切削行为时，切削刃逐渐进入切削区域，由于铣削过程为断续切削，刀具与工件的接触状态不断变化，从而导致材料的去除过程不稳定，致使各方向铣削力不断波动。当进入稳定铣削行为时，三个方向的铣削力波动幅度都有所减小，并且整体趋于相对稳定，这归因于刀-工系统逐渐进入相对稳定的工作状态时，铣削过程相对稳定，材料去除过程也较为均匀，因此各方向铣削力的波动较为平稳。铣削过程即将结束时，刀具与工件的接触面积快速减小，从而力信号幅值逐渐下降。

图 2-8(b)为 x 和 y 方向的局部力信号图，由此可以看出，当 x 方向的铣削力信号达到波峰时， y 方向铣削力处于波谷；而 x 方向铣削力处于波谷时， y 方向铣削力此时达到波峰状态； x 和 y 方向铣削力表现出峰谷异向交替的变化规律^[74]。



(a) 铣削力信号



(b) 力信号局部放大图

图 2-8 铣削力信号及信号放大图

2.3.2 力信号处理方法

试验中铣削力数据均通过 Kistler 测力仪软件 DynoWare 进行力信号处理,获取数据后导入 Origin 计算铣削力峰值的均值,铣削力的处理方法如下:

图 2-9 是每齿进给量为 0.01 mm/z 时,在干式条件下采用 PCD 常规刀具铣削得到的力信号图。

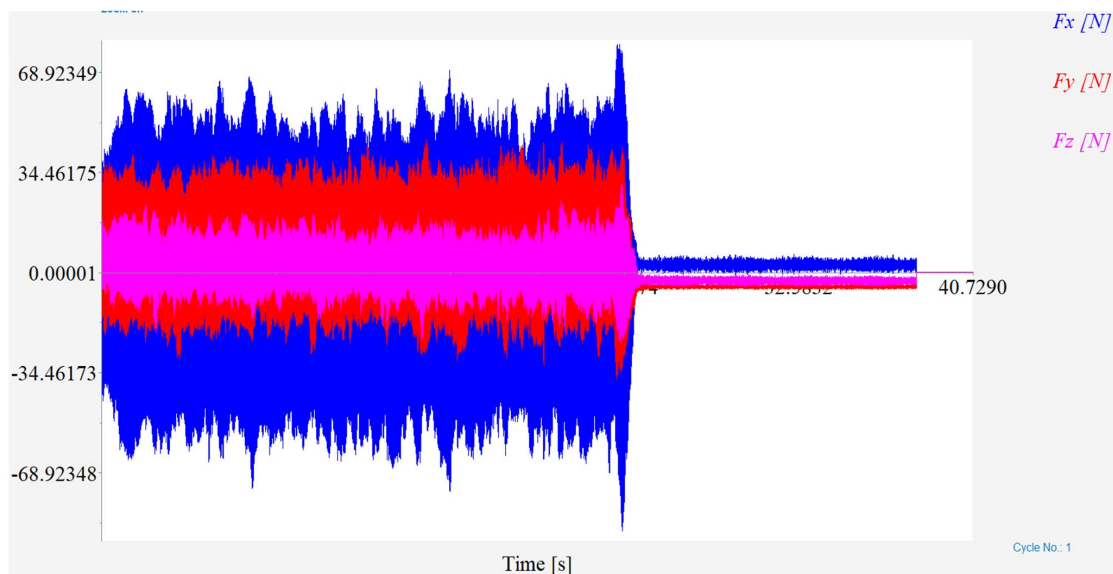


图 2-9 力信号图

选取稳定的切削工作区间作为铣削力结果，目的是排除铣削初期和铣削即将结束时的不稳定切削导致的试验干扰，如图 2-10 所示。

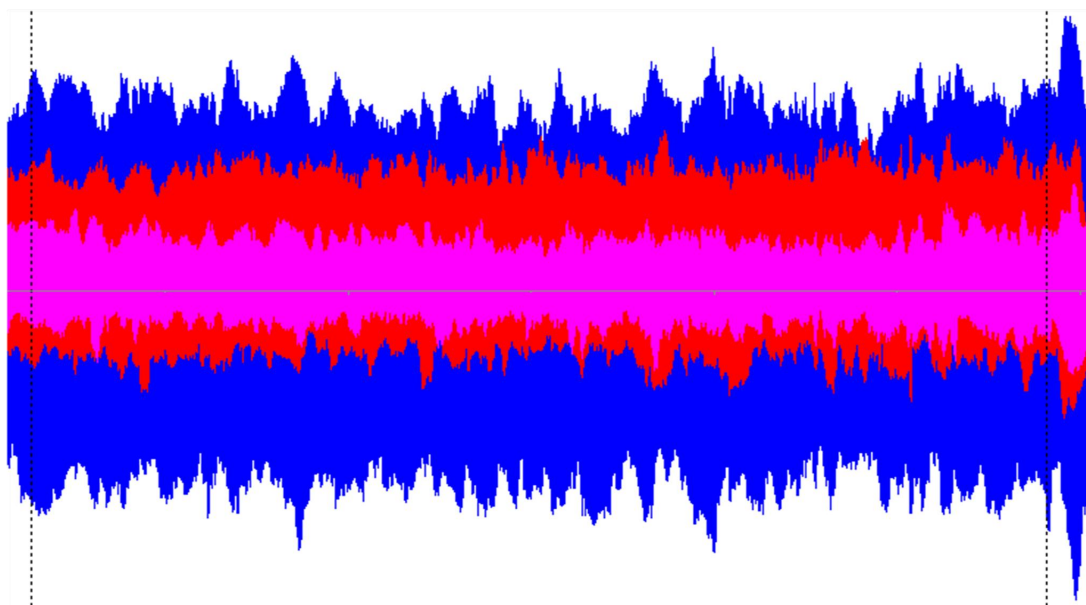
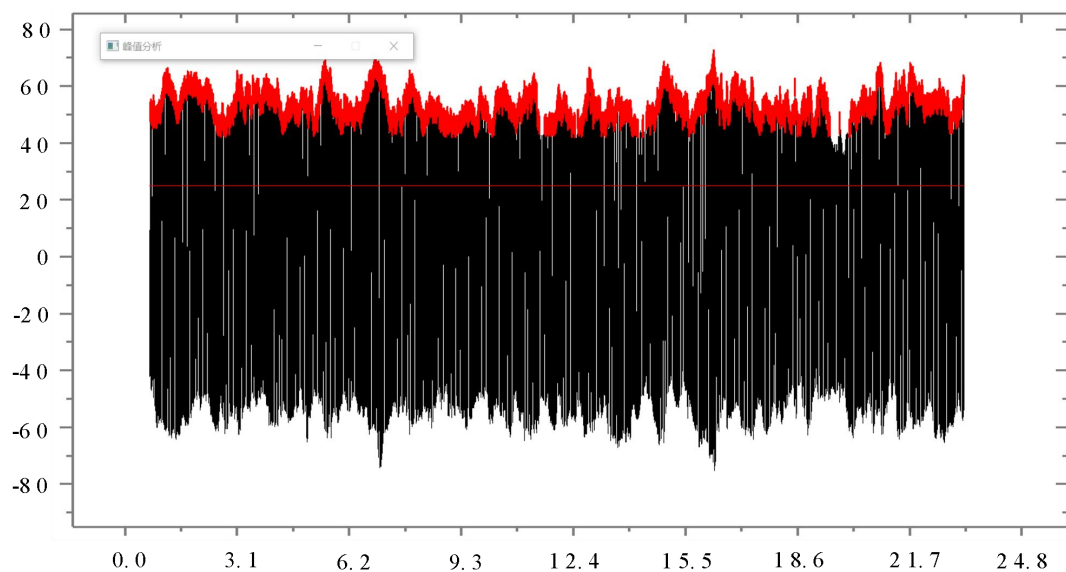
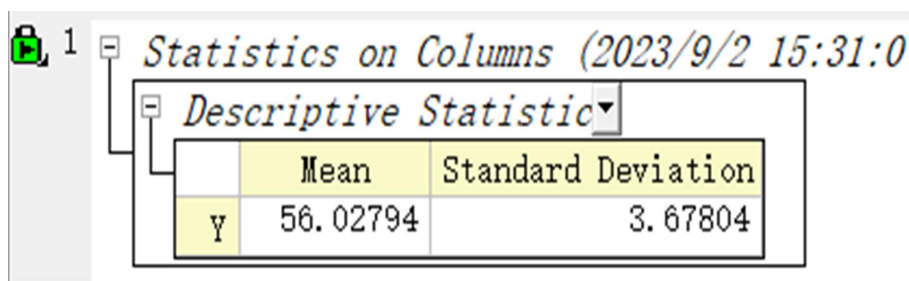


图 2-10 铣削区间选取

将数据文件导入 Origin，以 x 方向铣削力数据为例，选中 F_x 一列，进行峰值寻峰操作，并针对 x 方向铣削力数据所有峰值进行峰值均值计算，该结果就是所求 x 方向铣削力峰值最后的评价结果。对 F_x 进行基线选取以及峰值分析，并对铣削力的统计结果进行列统计，并计算出均值与标准差，如图 2-11 所示。



(a) 寻峰



(b) 输出结果

图 2-11 寻峰与输出结果

2.4 本章小结

本章详细介绍了本文的铣削试验方案以及分析了铣削力信号的特点：

(1) 选用聚晶金刚石 PCD 刀具和 PCD 织构化刀具，在变铣削深度和变每齿进给量的条件下，进行 PCD+干式、PCD+低温 CO₂、PCD 织构+干式和 PCD 织构+低温 CO₂ 四组铣削对比试验，分析刀具织构化和低温 CO₂ 冷却润滑对增材制造钛合金铣削性能的影响。

(2) 采用 PCDR 刀具作为刀具材料，在变每齿进给量的条件下，进行 PCDR+干式和 PCDR+低温 CO₂ 两组铣削对比试验，并与 PCD+干式和 PCD+低温 CO₂ 试验结果进行对比研究，分析刀具前角和低温 CO₂ 冷却润滑下增材制造钛合金的切削特性。

(3) 详细描述了铣削力信号的处理方法以及分析了力信号的特点，整个铣削

过程整体上不仅呈周期性变化,而且 x 和 y 方向上的铣削力表现出峰谷交替的变化规律。

第 3 章 PCD 织构刀具低温铣削试验

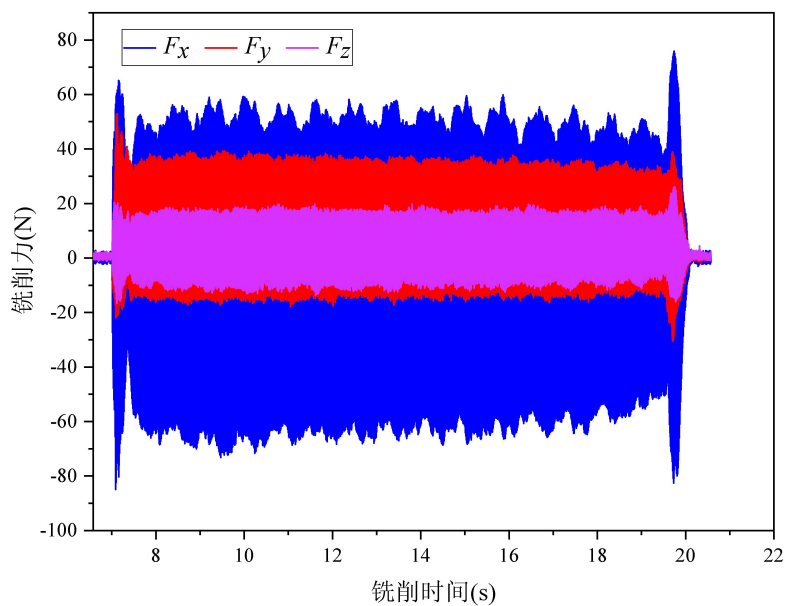
本章针对增材制造钛合金开展聚晶金刚石 PCD 刀具低温铣削试验研究, 采用 PCD 常规刀具与 PCD 织构化刀具, 在干铣削和低温 CO₂ 冷却润滑条件下进行对比实验。通过试验数据的对比分析, 探讨刀具织构化与低温冷却润滑在不同铣削深度和每齿进给量参数下对铣削力变化特征和切屑黏结行为的影响规律, 以及刀具表面织构与低温冷却润滑的协同作用机制及其对铣削性能的改善效果。

3.1 不同铣削深度下低温铣削试验

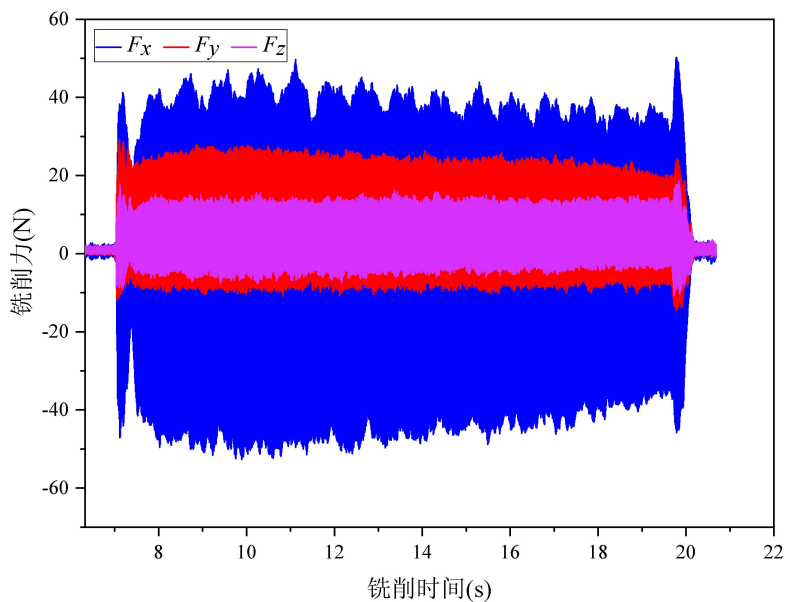
本节针对增材制造钛合金 TC4 展开铣削试验研究, 旨在仅改变铣削深度条件下, 分析 PCD 织构化刀具在不同条件下对铣削力和刀具前刀面表面黏结的影响。

3.1.1 铣削力信号对比分析

图 3-1 所示为相同铣削参数条件下($v_f=240$ mm/min, $a_p=0.25$ mm, $n=6000$ r/min), 采用低温 CO₂ 冷却润滑, 常规和织构刀具铣削力信号。从此图可观察到: 图中显示了增材制造钛合金铣削过程中三个方向的铣削力信号, 分别是 F_x (蓝色)、 F_y (红色) 和 F_z (粉色), 这些信号对应着铣削过程中铣削力的三维分量。在铣削主阶段, F_x 、 F_y 和 F_z 信号和变化总体稳定, 振幅在一定范围内波动, 说明增材制造钛合金铣削过程中力信号(F_x 、 F_y 和 F_z)波动较为规律, 整体呈现一定的周期性和稳定性。这种结果可能与增材制造钛合金材料分布均匀性有关。其中, F_x 信号总体幅值较 F_y 和 F_z 更高, 说明主铣削力 F_x 较大, F_y 、 F_z 较小, 因此本节重点针对 x 方向的主铣削力 F_x 进行对比分析。



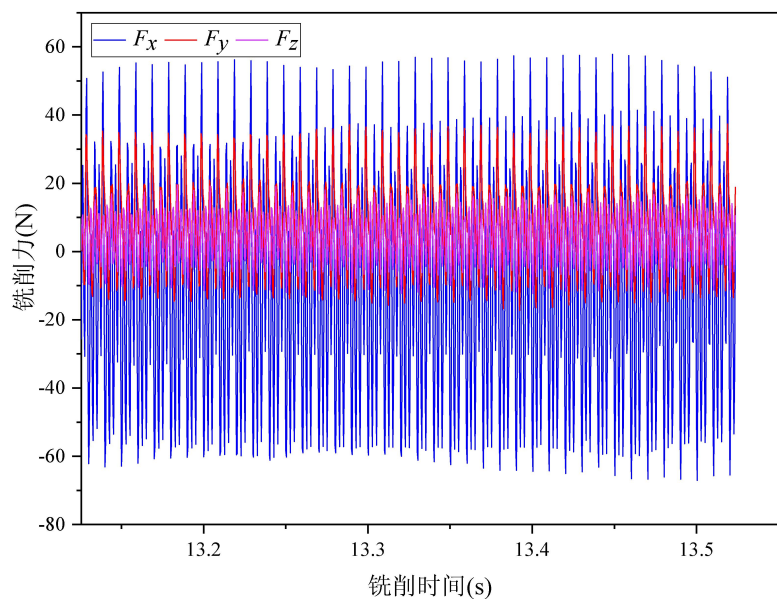
(a) PCD 铣削力信号



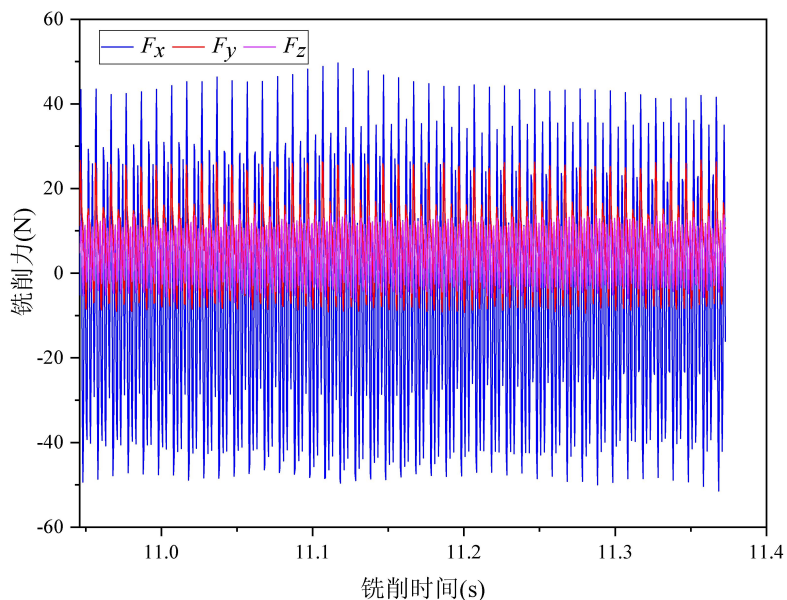
(b) PCD 结构化刀具铣削力信号

图 3-1 低温润滑下的常规和织构刀具铣削力信号

图 3-2 为上述条件下的力信号放大对比图,可以得出,在相同铣削参数和润滑条件下,PCD 常规刀具和 PCD 织构刀具最大的铣削力 F_x 数值分别约为 60.00 N, 45.00 N, 后者较前者的铣削力降幅达 25.00%。



(a) PCD 常规刀具铣削力信号



(b) PCD 织构化刀具铣削力信号

图 3-2 低温润滑下的常规和织构刀具铣削力信号放大对比

3.1.2 刀具织构化对主铣削力的影响

图 3-3 和图 3-4 所示，分别为干式和低温 CO_2 冷却润滑下的 PCD 刀具织构化对主铣削力的影响。如图 3-3，在干铣削下，随着铣削深度的增加，PCD 刀具铣削力 F_x 分别为 54.95 N、83.92 N 和 140.99 N，PCD 织构化刀具铣削力 F_x 分别为 157.61 N、202.64 N 和 232.04 N。同样，如图 3-4 所示，在低温 CO_2 冷却润滑下，随着铣削深度的增加，PCD 刀具铣削力 F_x 分别为 46.64 N、77.95 N 和 133.25

N, PCD 织构化刀具铣削力 F_x 分别为 38.80 N、49.60 N 和 79.51 N。

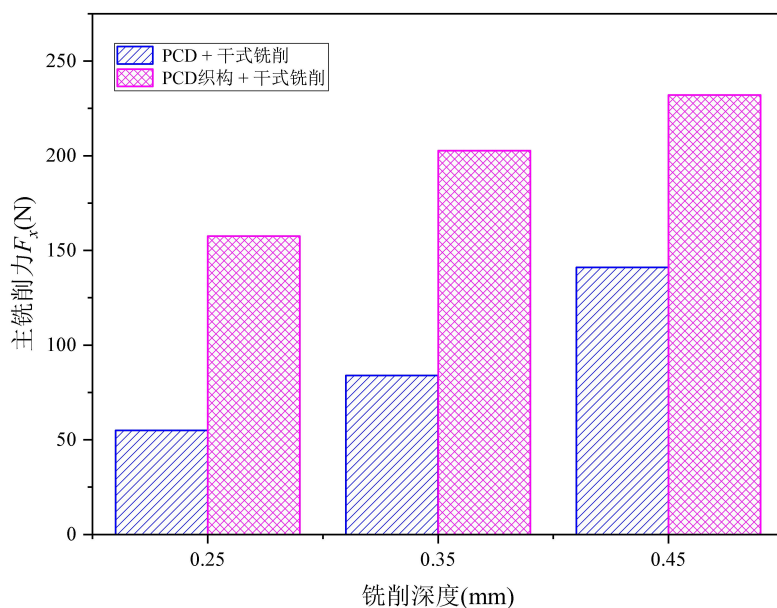


图 3-3 PCD 织构刀具干式条件下的主铣削力

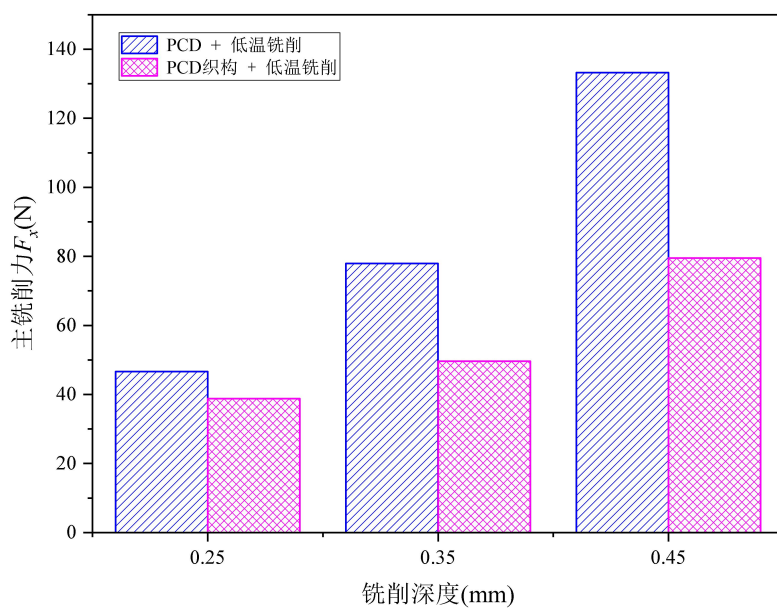


图 3-4 PCD 织构刀具低温条件下的主铣削力

由图 3-3 和图 3-4 可知，在干式条件下，与 PCD 刀具相比，刀具织构化并未减小铣削力，这可能归因于织构的置入增大了刀具表面粗糙度，进而增大了刀具摩擦系数和铣削力。与常规刀具相比，在低温润滑冷却下，刀具织构化明显降低了主铣削力，下降幅度达 16.80- 40.00%。

3.1.3 低温冷却润滑对主铣削力的影响

图 3-5 和图 3-6 所示，分别为低温 CO_2 冷却润滑对不同刀具主铣削力的影响。

如图 3-5，随着铣削深度的增加，PCD 刀具干铣削力 F_x 变化范围为 54.95-140.99 N，PCD 刀具低温铣削力 F_x 变化范围为 46.64-133.25 N，与干铣削相比，低温 CO_2 冷却润滑对铣削力的降低幅度约为 5.00-15.00%。

同样，如图 3-6 所示，随着铣削深度的增加，PCD 织构刀具干铣削力 F_x 变化范围为 157.61-232.04 N，PCD 织构刀具低温铣削力 F_x 变化范围为 38.80-79.51 N，与干铣削相比，低温冷却润滑对铣削力的降低幅度约 65.70-75.30%。

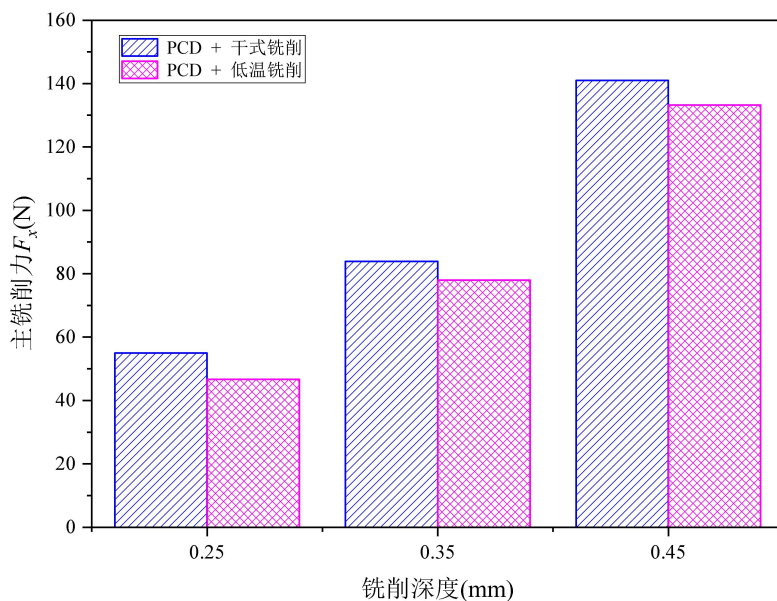


图 3-5 PCD 刀具干式和低温下的主铣削力

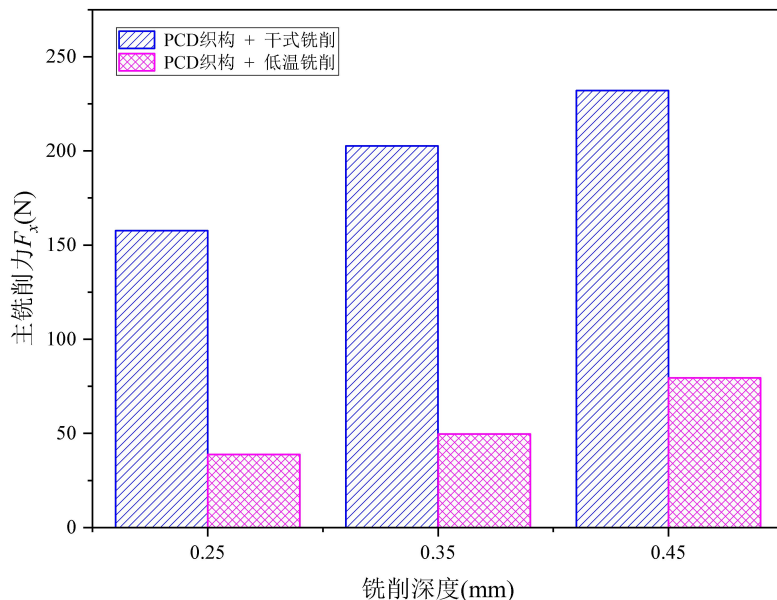


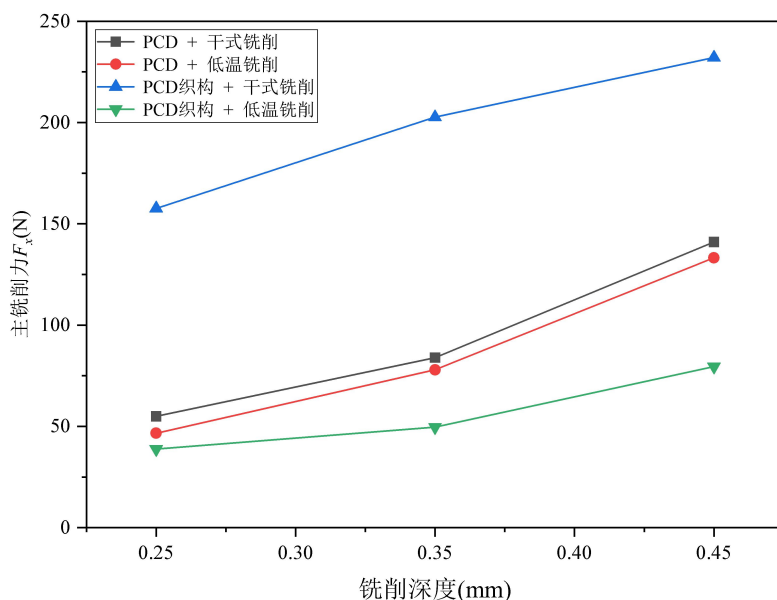
图 3-6 PCD 织构刀具干式和低温下的主铣削力

综上图 3-5 和图 3-6 可知，在相同的切削参数条件下，与干铣削相比，低温 CO_2 冷却润滑对 PCD 常规刀具铣削力 F_x 降幅较小，而结果显示低温 CO_2 冷却润

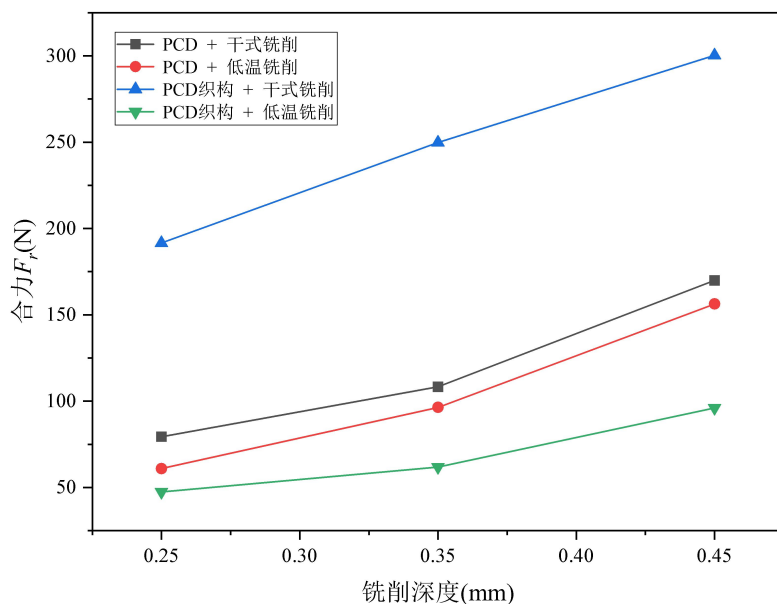
滑复合 PCD 织构刀具能够显著降低铣削力 F_x 。

3.1.4 不同条件下织构化刀具合力分析

图 3-7(a)和(b)为不同条件下 PCD 刀具和 PCD 织构刀具主铣削力和合力对比分析。



(a) 不同条件下主铣削力 F_x 对比



(b) 不同条件下的 F_y 对比

图 3-7 不同条件下不同刀具主铣削力和铣削合力对比

从图 3-7 可以分析，无论是干铣削或者低温润滑下，当铣削深度不断增加时，PCD 刀具和 PCD 织构刀具的主铣削力 F_x ，以及两者对应的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z

的合力 F_r 也表现出逐渐增大的趋势, 且相同条件下合力 F_r 和主铣削力 F_x 的变化规律一致性较好。

根据图 3-7(b), 当铣削深度从 0.25 mm 增加到 0.45 mm 时, PCD 刀具干铣削、PCD 刀具低温铣削、PCD 织构刀具干铣削、PCD 织构刀具低温铣削的合力 F_r 分别为 79.44 N、108.29 N 和 169.92 N; 60.95 N、96.41 N 和 156.27 N; 191.58 N、249.75 N 和 300.29 N; 47.45 N、61.89 N 和 96.10 N。

由图 3-7(b) 四种条件下的铣削力结果显示, 在低温 CO_2 冷却润滑下, PCD 织构化刀具产生的合力 F_r 最小。相同铣削深度下, 与 PCD 常规刀具和 PCD 织构刀具干铣削相比, 其相同刀具低温铣削合力 F_r 分别降低约 8.00-23.30% 和 68.00-75.20%。

3.1.5 低温下的刀具表面黏结情况分析

如图 3-8(a)、(b) 及 (c) 所示分别为 PCD 常规刀具干铣削、PCD 常规刀具低温铣削和 PCD 织构刀具低温铣削后的刀具前刀面黏结情况。

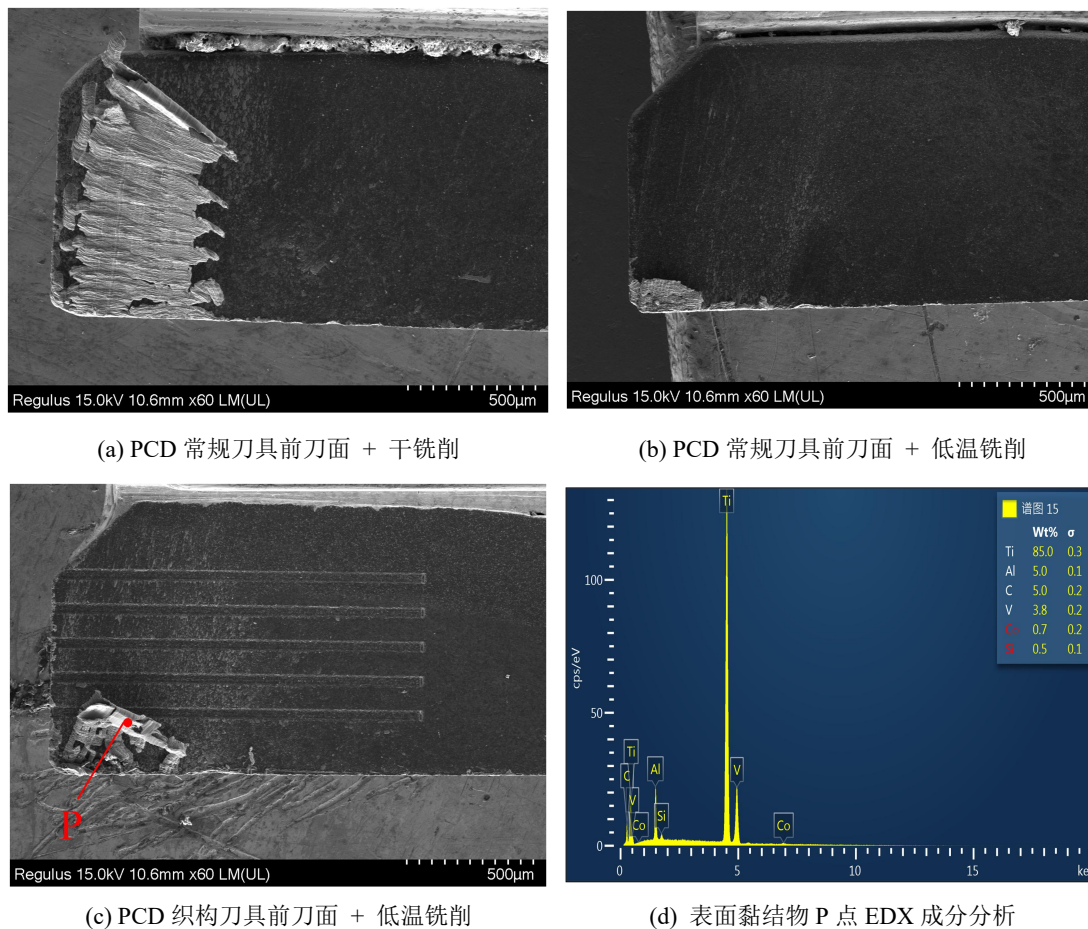


图 3-8 不同条件下刀具表面黏结及 EDX 分析

通过图 3-8(d)点 P 区域黏结物 EDX 成分分析可知,该黏结层主要为钛元素,可判定其来源于铣削增材制造钛合金过程中的切屑黏结物。由图 3-8 可明显看出,在干铣削条件下,常规 PCD 刀具表面切屑黏结物十分严重,而在低温 CO_2 冷却润滑下,PCD 常规刀具和 PCD 织构刀具表面的黏结情况均要优于 PCD 常规刀具干铣削刀具黏结。结果显示,应用低温 CO_2 冷却润滑下能够有效提高刀具表面的抗黏结性能。

3.2 不同进给量下低温铣削试验

本节在改变每齿进给量的条件下,探究在干式和低温 CO_2 冷却润滑条件下刀具织构化对铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 和合力 F_r 的影响规律,并结合微观表征手段对刀具表面黏结、铣削加工后工件槽底表面粗糙度和切屑形态展开分析。

3.2.1 低温对刀具铣削力的影响

图 3-9 为在干式和低温 CO_2 冷却条件下,PCD 刀具的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 变化曲线,随着每齿进给量的增加,PCD 刀具干式和低温铣削下的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 如表 3-1 所示。

从图 3-9 中分析出,当每齿进给量从 0.01 mm/z 增大到 0.04 mm/z 时,PCD 刀具干式铣削和低温铣削的铣削力都呈增大趋势。在相同进给量下,PCD 刀具低温铣削的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 都要小于干式铣削,其整体下降幅度分别为 15.58-64.39%、33.09-60.13%和 31.65-59.19%。结果表明,低温冷却能有效降低 PCD 刀具铣削力。

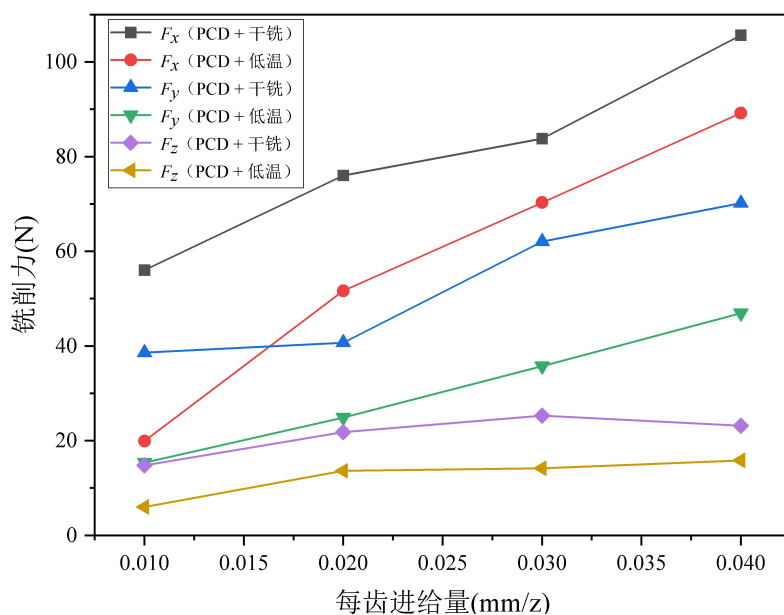


图 3-9 不同润滑条件下 PCD 刀具铣削力

表 3-1 PCD 刀具铣削力

切削方式	每齿进给量 (mm/z)	铣削力 F_x (N)	铣削力 F_y (N)	铣削力 F_z (N)
PCD+干铣削	0.01	56.03	38.63	14.80
	0.02	76.03	40.73	21.83
	0.03	89.81	62.08	25.32
	0.04	105.68	70.18	23.19
PCD+低温铣削	0.01	19.95	15.40	6.04
	0.02	51.67	24.91	13.64
	0.03	70.32	35.79	14.19
	0.04	89.21	46.96	15.85

图 3-10 为 PCD 织构化刀具在干式和低温冷却下的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 变化曲线，其中，PCD 织构化刀具干式铣削下的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 如表 3-2 所示。

从图 3-10 曲线中可以分析，随着每齿进给量的增大，PCD 织构化刀具干式铣削和低温铣削的铣削力 F_x 逐渐增大，铣削力 F_y 和 F_z 整体上也都有着增大趋势。当每齿进给量相同时，PCD 织构化刀具低温铣削的切削力 F_x 、 F_y 和 F_z 都要比干式铣削小，并且对应下降幅度分别为 75.05-85.58%、74.39-84.33%和 63.97-77.07%。结果表明，PCD 刀具的织构化复合低温冷却的降力效果显著。

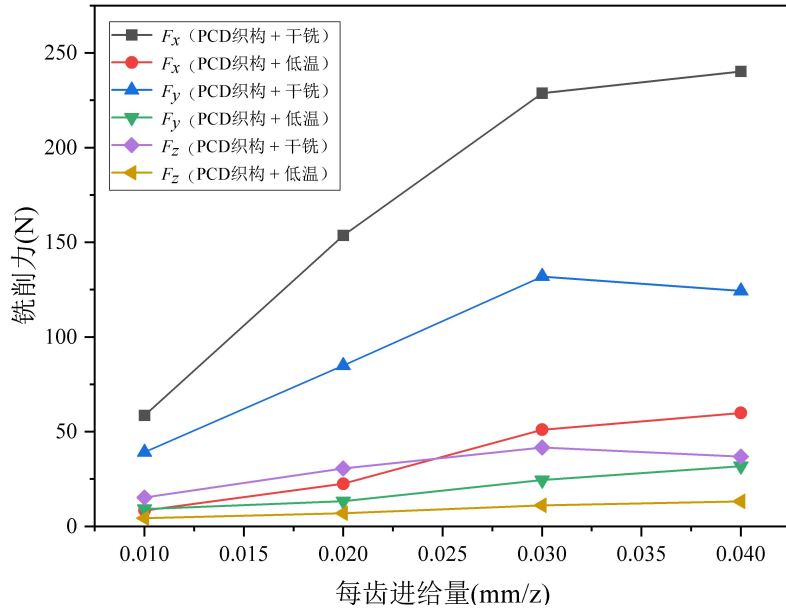


图 3-10 不同润滑条件下 PCD 织构刀具铣削力

表 3-2 PCD 织构化刀具铣削力

切削方式	每齿进给量 (mm/z)	铣削力 F_x (N)	铣削力 F_y (N)	铣削力 F_z (N)
PCD 织构+干铣	0.01	58.61	39.19	15.33
	0.02	153.71	84.96	30.70
	0.03	228.77	131.97	41.77
	0.04	240.26	124.37	36.89
PCD 织构+低温 铣削	0.01	8.45	9.24	4.37
	0.02	22.57	13.31	7.04
	0.03	51.07	24.51	11.16
	0.04	59.94	31.85	13.29

3.2.2 织构对刀具铣削力的影响

图 3-11 为在干式条件下，PCD 刀具和 PCD 织构化刀具铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 变化曲线。其中，PCD 刀具的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 的范围分别为 56.03-105.68 N、38.63-70.18 N 和 14.80-25.32 N，PCD 织构化刀具的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 的范围分别为 58.61-240.26 N、39.19-131.97 N 和 15.33-41.77 N。从图 3-11 可以看出，在相同进给量下，PCD 刀具铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 均小于 PCD 织构化刀具，并且降幅分别为 4.40-63.36%、1.43-52.96%和 3.46-39.38%。结果表明，在干式条件下，相对于常规刀具，织构的置入不利于降低铣削力。

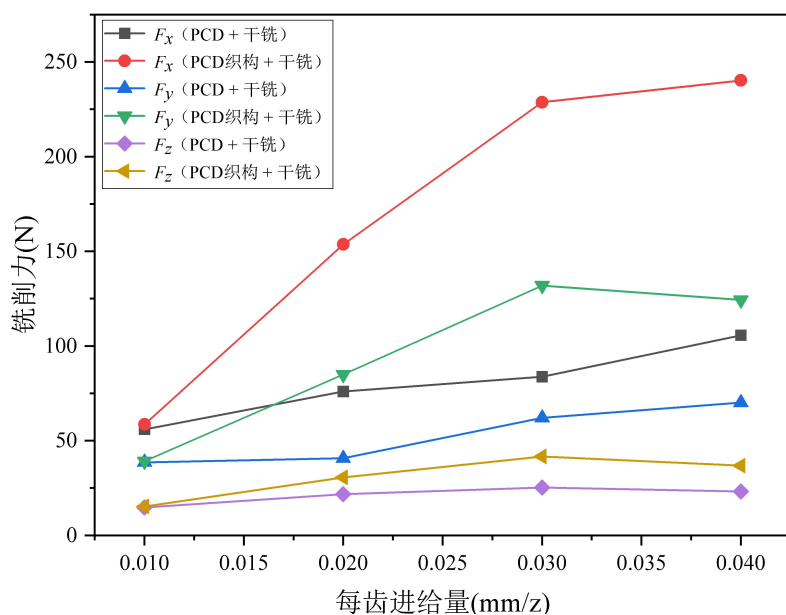


图 3-11 干式下不同刀具铣削力

图 3-12 为在低温冷却条件下，PCD 刀具和 PCD 织构化刀具铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 变化曲线。随着每齿进给量在 0.01-0.04 mm/z 变化时，PCD 刀具的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 分别为 19.95-89.21 N、15.40-46.96 N 和 6.04-15.85 N，PCD 织构化刀具的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 分别为 8.45-59.94 N、9.24-31.85 N 和 4.37-13.29 N。

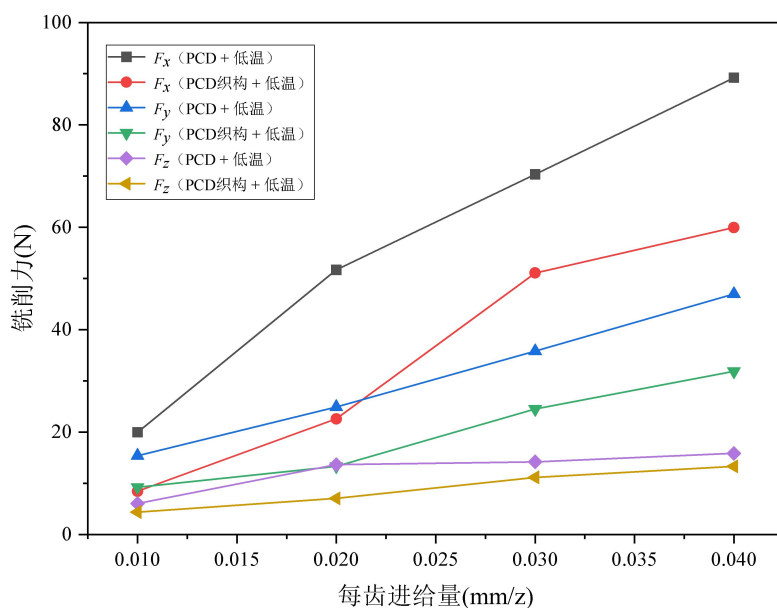


图 3-12 低温下不同刀具铣削力

从图 3-12 曲线可以看出，在进给量相同时，PCD 织构化刀具铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 都要小于 PCD 刀具，降低幅度分别为 27.37-57.64%、31.52-46.57% 和 16.15-48.39%。结果表明，在低温冷却条件下，相对于 PCD 刀具，织构的置入能有效降低铣削力。

3.2.3 不同条件下铣削合力分析

图 3-13 为每齿进给量变化时，刀具铣削合力 F_r 变化曲线，其中，随着进给量逐渐增大，PCD 刀具干式铣削下的合力如表 3-3 所示。

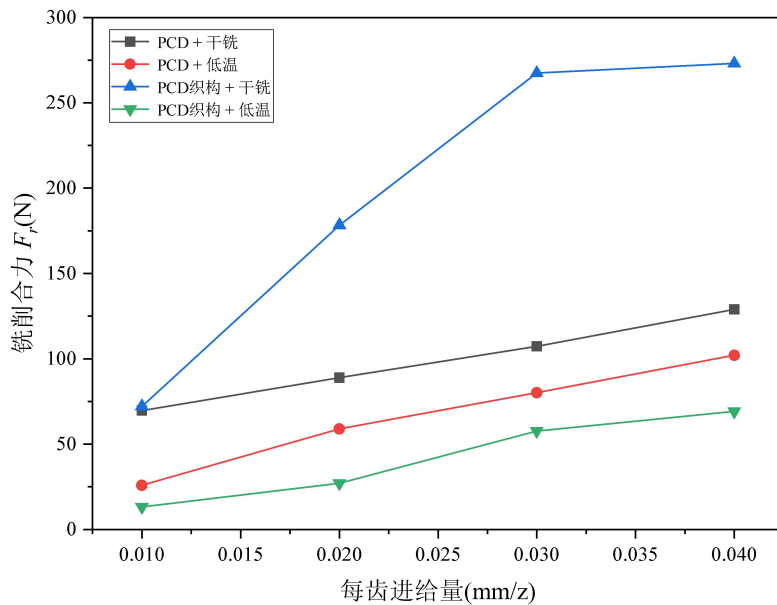


图 3-13 不同条件下的合力

表 3-3 刀具铣削合力

	PCD+干铣削	PCD 织构+干铣削	PCD+低温铣削	PCD 织构+低温铣削
每齿进给量 (mm/z)	合力(N)			
0.01	69.65	72.15	25.92	13.26
0.02	88.97	178.29	58.96	27.13
0.03	107.33	267.39	80.17	57.74
0.04	128.96	273.05	102.05	69.17

从图 3-13 曲线中可以看出，在相同进给量下，PCD 刀具结构化复合低温铣削下的铣削力最小。相对于 PCD 刀具结构化刀具干式铣削，相同刀具低温铣削下的铣削合力下降了 74.67-84.78%，降力效果显著；在低温 CO_2 冷却润滑下，PCD 刀具结构化刀具的铣削合力相较于 PCD 刀具，幅度下降 27.98-53.99%，有效降低铣削力。

3.2.4 刀具织构化对粗糙度影响

本试验测量了不同铣削参数下铣削槽底部的表面粗糙度来表征加工后的表面质量，每道铣槽共选取 3 处不同区域，取其均值作为结果进行分析。

图 3-14 和图 3-15 分别为不同刀具在干式和低温 CO_2 冷却条件下的表面粗糙度曲线。

在干式条件下，每齿进给量 0.01-0.04 mm/z 变化时，PCD 常规刀具和 PCD 组织化刀具下的表面粗糙度如表 3-4 所示。

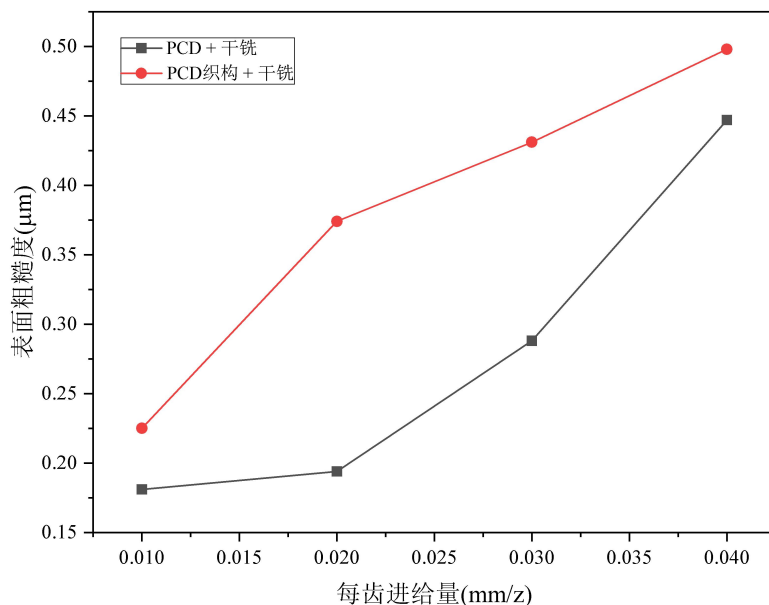


图 3-14 干式下表面粗糙度

表 3-4 干铣削下槽底粗糙度

切削方式	每齿进给量(mm/z)	平均表面粗糙度(μm)
PCD+干铣削	0.01	0.181
	0.02	0.194
	0.03	0.288
	0.04	0.447
PCD 组织+干铣削	0.01	0.225
	0.02	0.374
	0.03	0.431
	0.04	0.498

同样，在低温 CO_2 冷却条件下，随着每齿进给量逐渐增加，PCD 常规刀具和 PCD 组织化刀具下的表面粗糙度如表 3-5 所示。

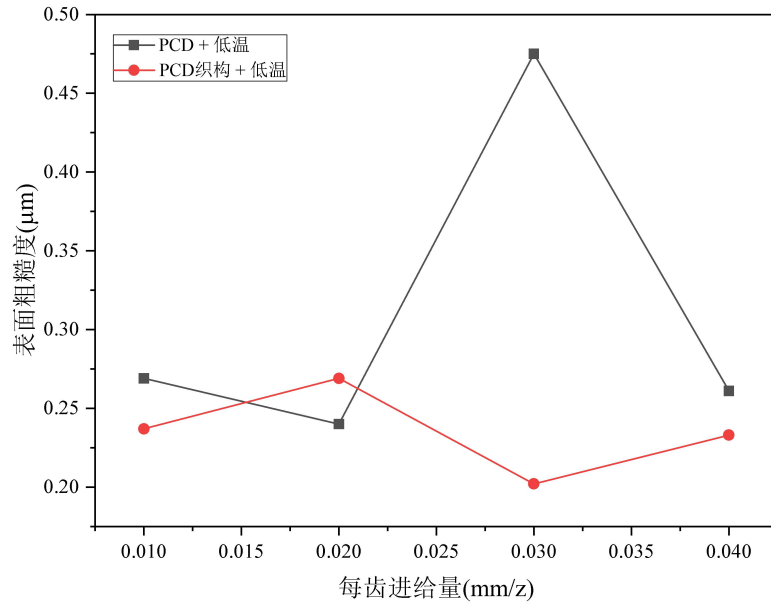


图 3-15 低温下表面粗糙度

表 3-5 低温铣削下槽底粗糙度

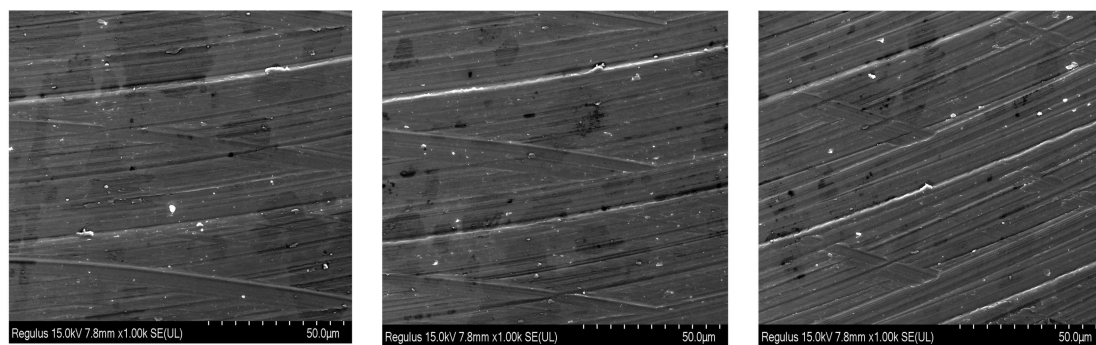
切削方式	每齿进给量(mm/z)	平均表面粗糙度(μm)
PCD+低温铣削	0.01	0.269
	0.02	0.240
	0.03	0.475
	0.04	0.261
PCD 织构+低温铣削	0.01	0.237
	0.02	0.269
	0.03	0.202
	0.04	0.233

从图 3-14 和图 3-15 可以看出,在干式条件下,当每齿进给量相同时,PCD 刀具结构化引起的表面粗糙度高于 PCD 常规刀具;而在低温 CO_2 冷却润滑条件下,相对于 PCD 常规刀具,PCD 结构化刀具下的表面粗糙度在整体趋势上有所减小。结果显示,在干式条件下,PCD 刀具结构化不利于减小表面粗糙度,而在低温 CO_2 冷却润滑条件下,PCD 刀具结构化对于减小表面粗糙度有着改善的趋势。

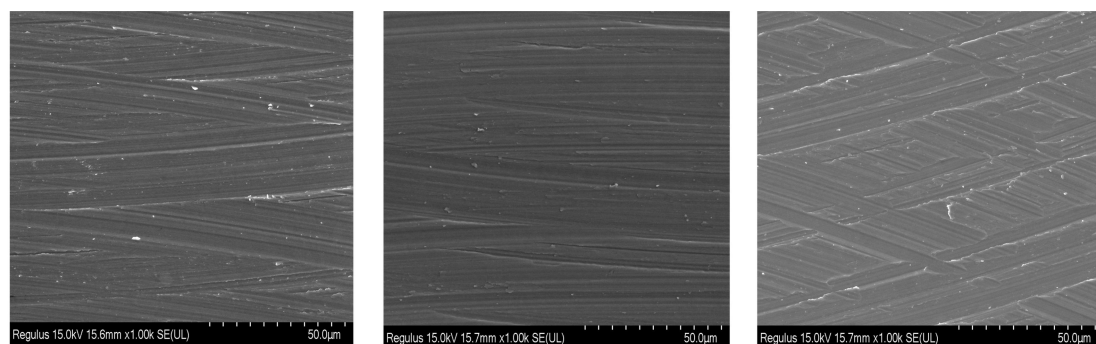
产生这一结果的原因是:在干式条件下,结构的置入使刀具表面的摩擦系数增大,由于没有冷却润滑,PCD 结构化刀具铣削过程中会使摩擦加剧,使得工件塑性变形增大,进而导致表面粗糙度增大。在低温 CO_2 冷却下,相对于 PCD 结构化刀具,一方面常规刀具的铣削力相对较大,使切削区的工件材料产生较大的塑性变形,导致粗糙度增大;另一方面 PCD 结构化刀具表面结构能更好地促进低温 CO_2 流动,使冷却更加充分,并且结构的置入使切屑更快地脱离刀具表

面，提高铣削区域的换热效率，减小残留切屑与工件表面的挤压，从而降低表面粗糙度。

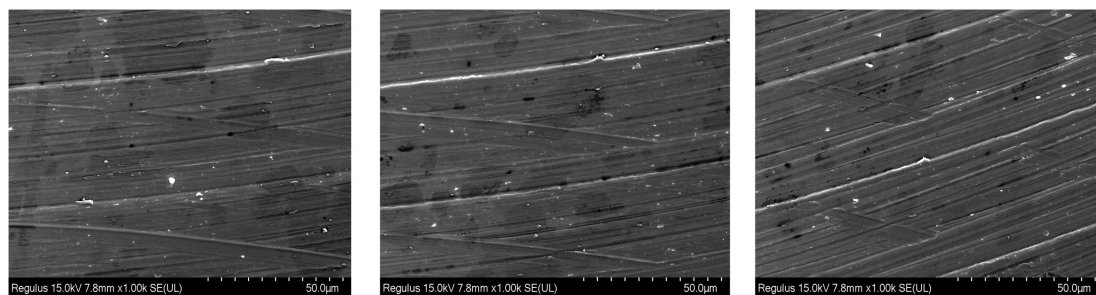
图 3-16 和图 3-17 分别展示了在每齿进给量为 0.02 mm/z 和 0.04 mm/z 条件下，四种组合条件加工后的表面形貌，并从中各选取了三个不同区域的 SEM 图像进行分析。



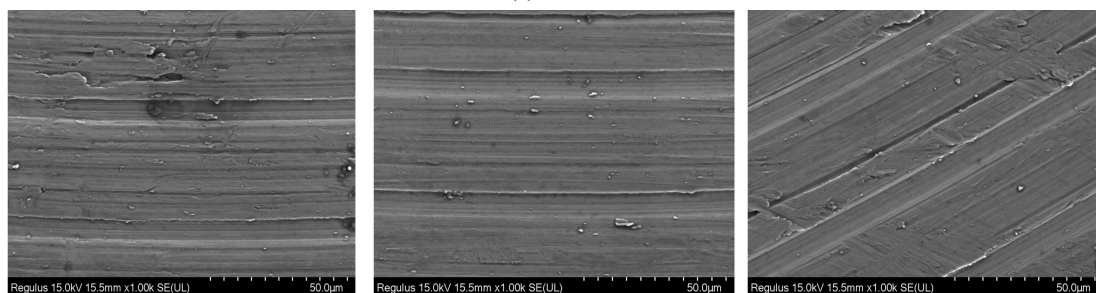
(a) CPDC



(b) TPCC



(c) CPCC



(d) TPDC

图 3-16 不同条件下表面质量对比($f_z=0.02 \text{ mm/z}$)

PCD 干式铣削、PCD 织构低温铣削、PCD 低温铣削和 PCD 织构干式铣削四种组合条件加工后的表面形貌分别以 CPDC、TPCC、CPCC 和 TPDC 来表示。

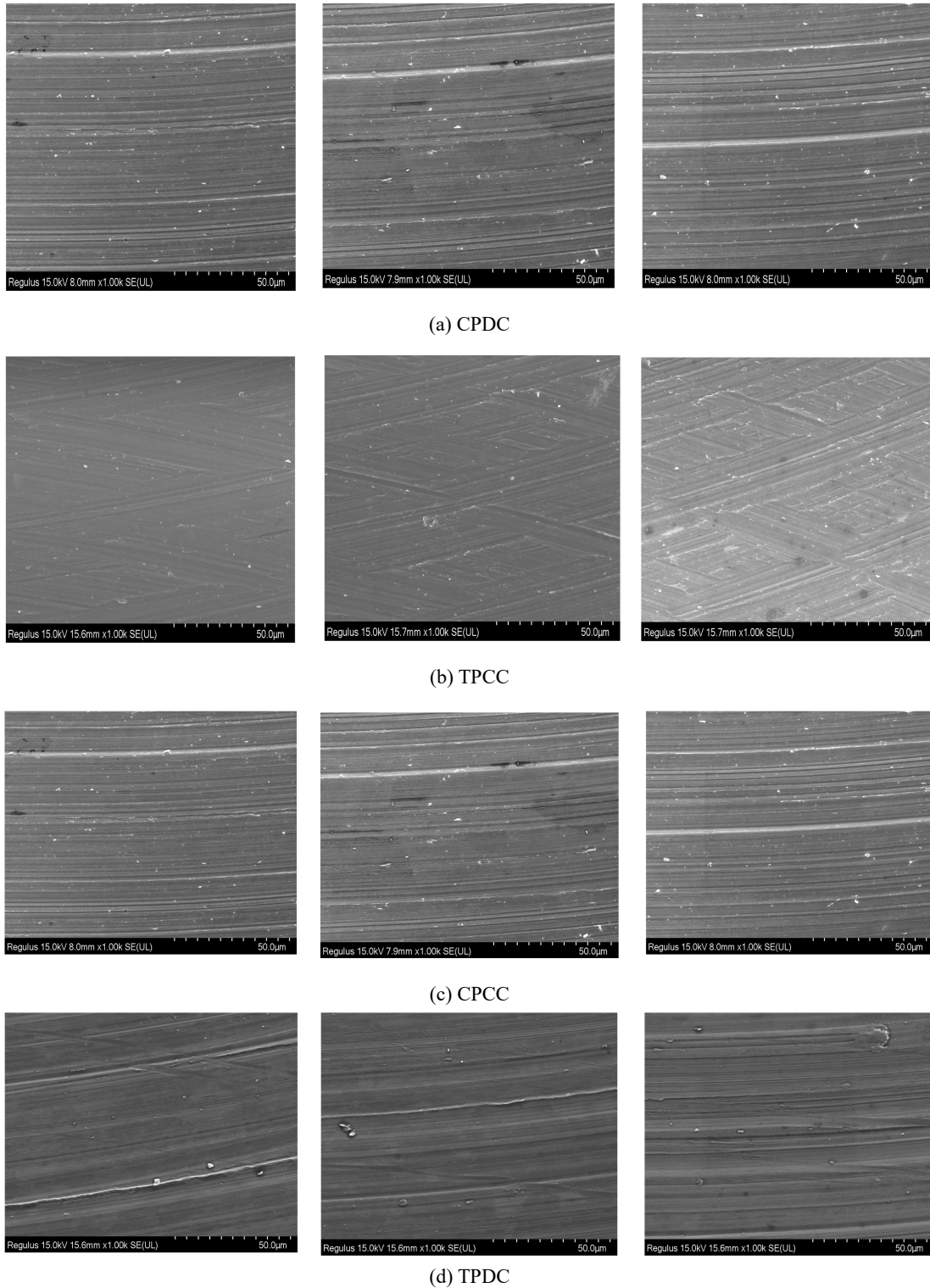


图 3-17 不同条件下表面质量对比($f_z=0.04 \text{ mm/z}$)

从图 3-16(a)、(c)、(d)和图 3-17(a)、(c)、(d)中可以明显看出，CPDC 存在明显划痕，表面质量更差。相比之下，如图 3-16(b)和图 3-17(b)所示，TPCC 整体

上获得了较为光滑的加工表面。上述试验结果表明,在每齿进给量一定时,PCD 织构化刀具复合低温 CO_2 铣削所获得的加工表面优于 PCD 干式铣削下的加工效果,这与图 3-14 和图 3-15 所示的表面粗糙度结果基本一致。

3.2.5 刀具表面黏结情况分析

不同条件下刀具表面黏结情况如图 3-18 所示,从图 3-18 可以看出,对相同类型刀具而言,低温冷却能够显著改善刀具表面黏结。在干式条件下,与常规刀具相比,织构化刀具表面黏结较为严重(图 3-18(a)和(c)所示),主要归因于:在干式条件下,由于没有冷却润滑介质,织构的置入增大了刀具表面的粗糙度,从而增大了铣削摩擦,加之钛合金材料的塑性流动特性,从而导致刀具表面更大的黏结区域和更多的黏结物。

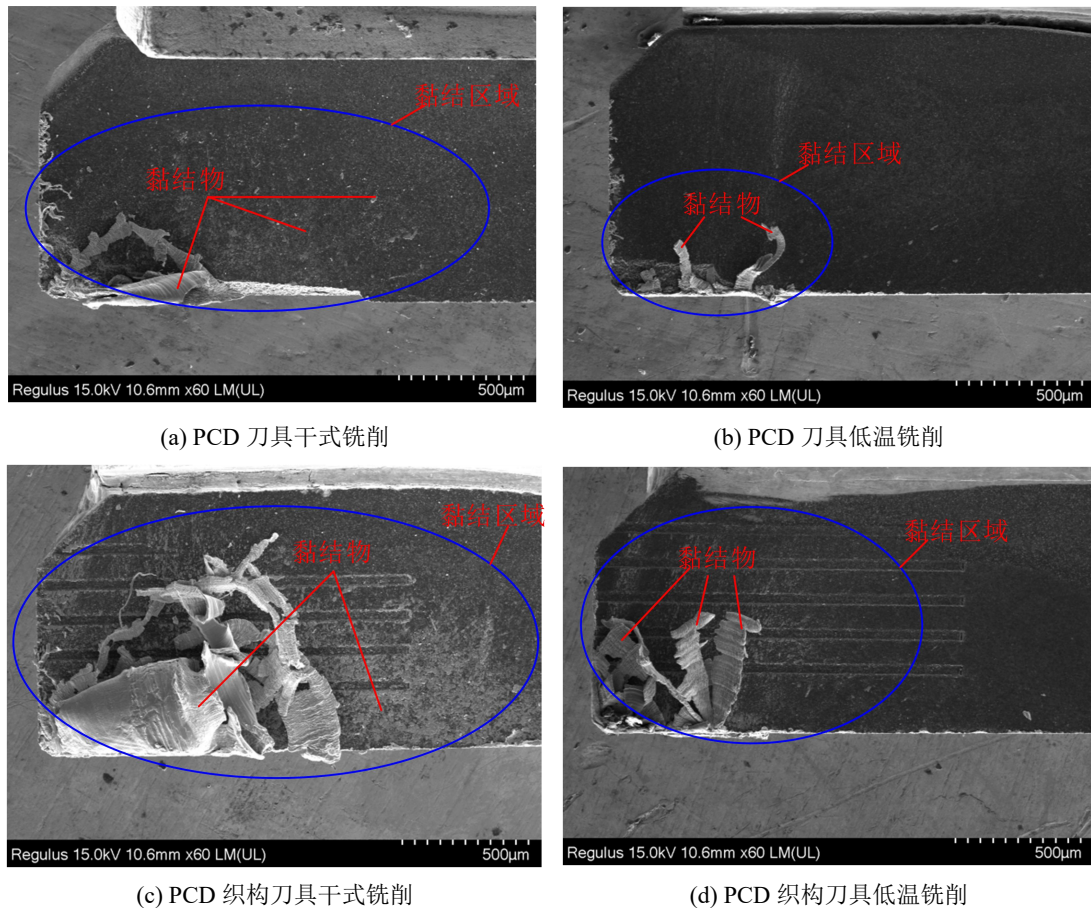


图 3-18 刀具表面黏结

根据图 3-18(a)和(b),以及图 3-18(c)和(d)结果发现:相对同种类型刀具,低温冷却润滑下的刀具表面黏结情况均优于干式加工。可能主要归因于:低温二氧化碳冷却润滑介质有助于进入刀-屑接触界面,降低切削摩擦区域的切削温度、

切削力及摩擦系数，从而有效抑制刀具表面黏结区域的扩展，更好地改善刀具表面黏结效果。

3.2.6 表面硬度和切屑形态分析

图 3-19 为不同工件表面硬度对比和分析，根据图 3-19(a)所示，通过对增材制造钛合金表面不同位置进行布氏硬度测量，共获得 8 组有效数据，其测量的硬度数值分别为 311、325、302、309、315、307、319 和 306，其平均布氏硬度测量值约为 312，且明显高于传统锻造钛合金表面的平均布氏硬度测量值，这主要归因于增材制造钛合金具有比传统锻造材料更加精细的微观组织^[75]。

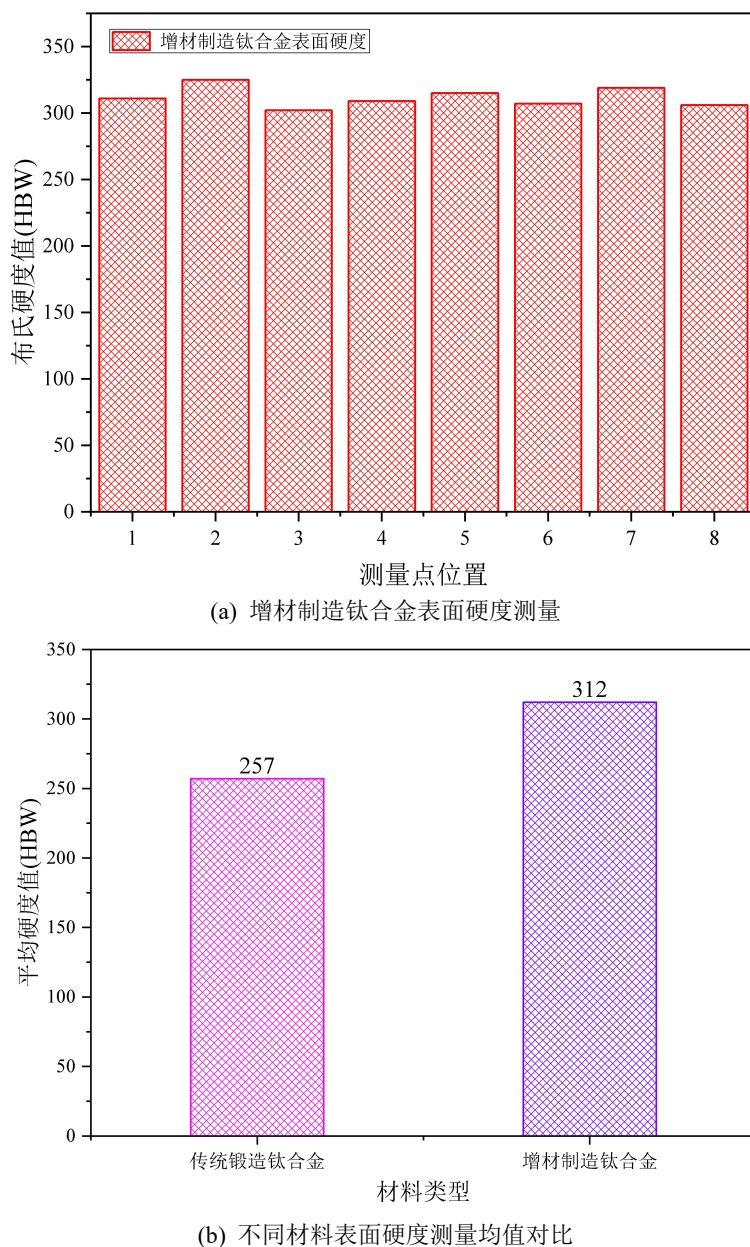


图 3-19 不同工件表面硬度对比和分析

图 3-20 所示为增材制造钛合金常规刀具干铣后的切屑宏观和微观形态，在该试验中，主轴转速和铣削深度取值分别为 6000 r/min 和 0.2 mm，其中图 3-20(a)-(d)的进给速度分别为 120 mm/min、240 mm/min、360 mm/min 和 480 mm/min。

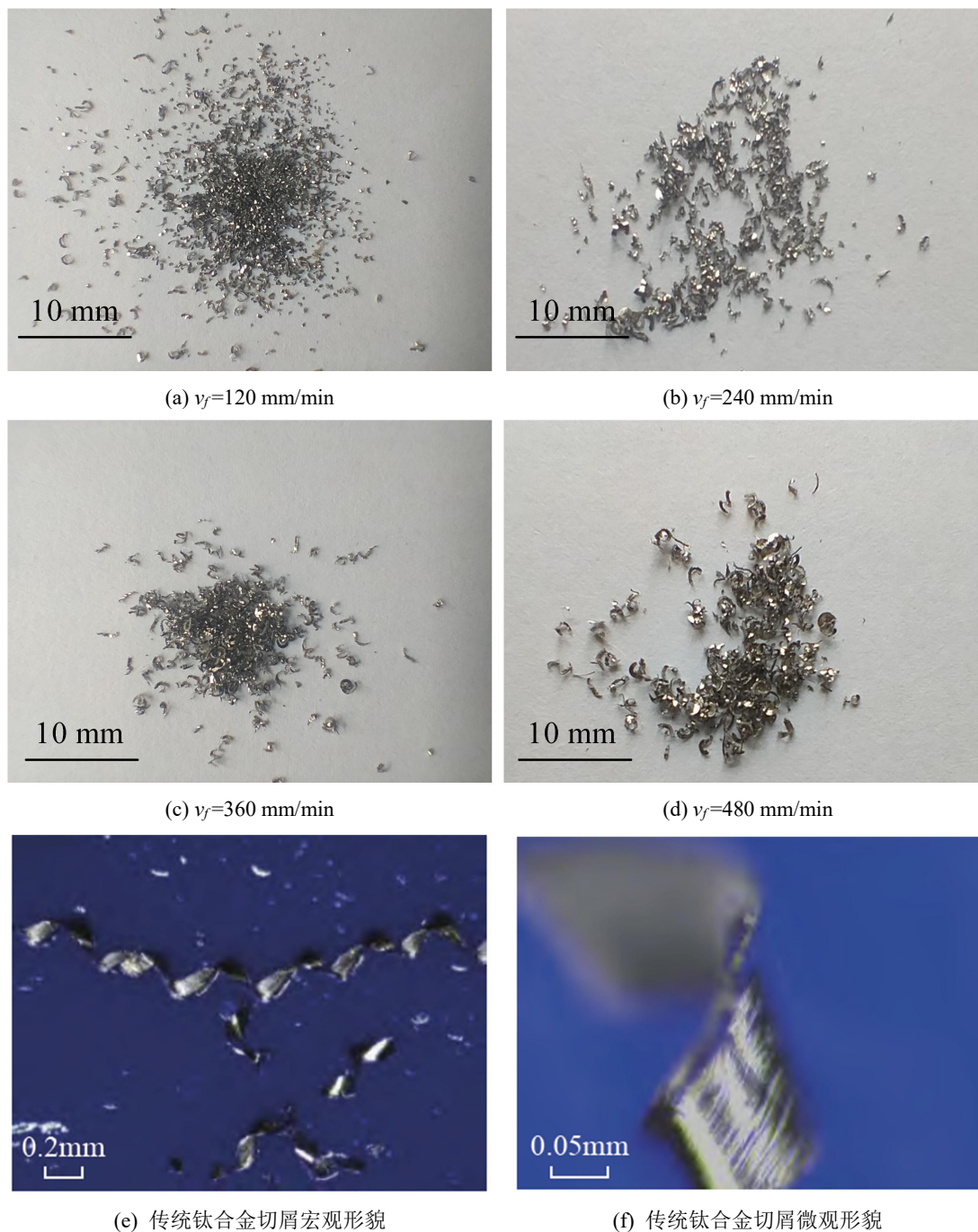


图 3-20 增材制造钛合金干铣削切屑形貌分析

根据试验结果，随着进给速度的增加，产生的切屑宏观形态逐渐增大，且宏观切屑形态大多是较短的断续切屑，这与文献^[76]所述传统钛合金铣削产生的连续切屑形态差异性较大（如图 3-20(e)和(f)），这可能归因于：增材钛合金表面硬

度明显高于传统钛合金表面，导致前者具有更高的脆性和低塑性流动特性，形成的切屑多为断续和较短形态，这有助于减少刀具与切屑的缠结和摩擦，从而降低铣削力和切屑附着力。

3.3 铣削力机理讨论和分析

上述试验中，在铣削参数一定时，随着每齿进给量的增加，刀具产生的铣削力在逐渐增大。这归因于：每齿进给量增加，单位时间内，增材制造钛合金 TC4 的去除率增加，铣削过程中刀具承受的摩擦力增大，从而使得铣削力增大。随着铣削深度的增加，刀具产生的铣削力也在逐渐增大。这归因于：铣削深度增大的同时，钛合金的切削面积和切削厚度增大，材料的去除量增大，导致铣削力增大。

试验结果发现，无论是铣削深度还是每齿进给量改变，在干式条件下，PCD 织构化刀具产生的铣削力比 PCD 刀具大，这归因于织构的置入增大了刀具表面粗糙度，进而增大刀具摩擦系数，从而增大铣削力。其中，随着铣削深度的增大，与干式铣削相比，低温 CO₂ 冷却润滑对常规 PCD 刀具铣削力 F_x 降幅较小，造成这一结果的原因可能是：采用常规 PCD 刀具的情况下，在铣削过程中由于刀-屑接触的紧密性，外部低温 CO₂ 并未充分渗透到刀-屑界面，因而降低铣削力的幅度不大。

试验结果可以得出，PCD 刀具织构化复合低温 CO₂ 冷却润滑方式有着显著的降力效果。这归因于以下两个方面：一方面，由于铣刀前刀面微米织构的存在，刀-屑接触长度如下面公式

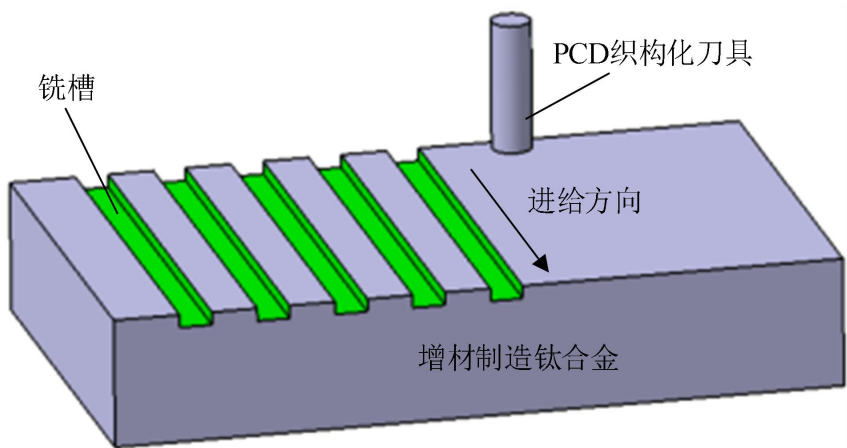
$$l_{factual} = l_f - N \cdot d \quad (3-1)$$

其中， $l_{factual}$ 为刀-屑实际接触长度， l_f 为刀-屑名义接触长度， N 是微织构数量， d 为刀具微织构宽度。

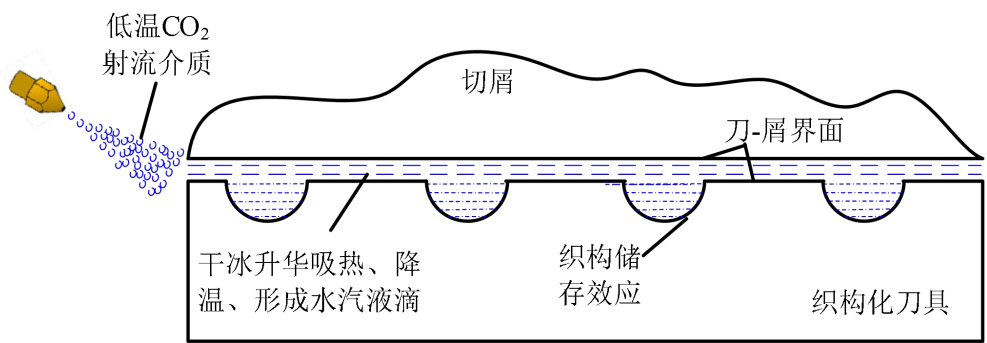
根据公式(3-1)，可以看出，在低温润滑条件下，相较于常规 PCD 刀具而言，PCD 织构化刀具降低了刀-屑实际接触长度、减少了摩擦接触面积，导致了铣削过程中的铣削力降低^[77-79]，减少了铣削摩擦，有助于改善切屑黏结和铣削性能。

另一方面，如图 3-21 所示，PCD 织构化刀具铣削增材制造钛合金过程中，外界供应的低温 CO₂ 润滑介质更易进入刀-屑接触界面，易于与空气中水蒸气遇冷液化成水滴，储存在刀-屑界面和微织构内部，显著改善切削接触界面的冷却

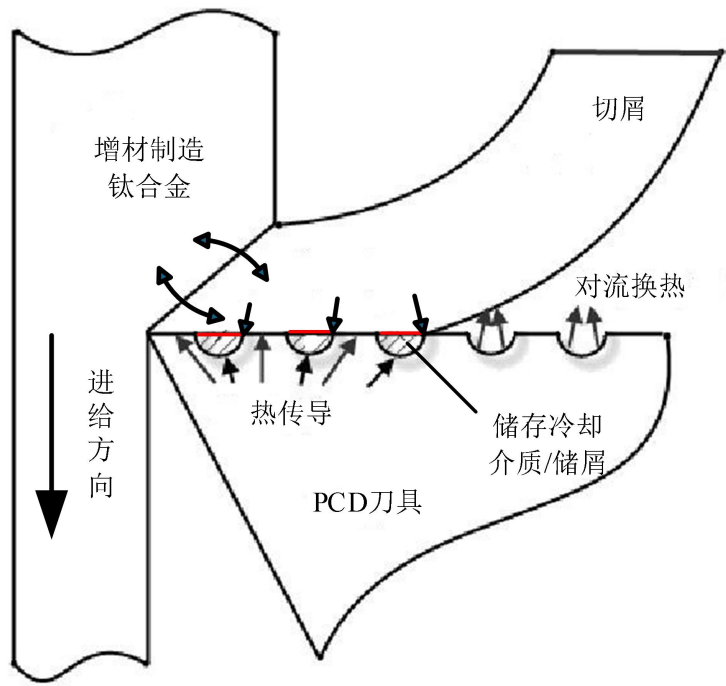
润滑效果，从而有效降低了铣削力、刀具表面黏结和刀具磨损，改善了铣削性能。



(a) PCD 织构化刀具铣削示意图



(b) 织构化刀具+低温射流



(c) 织构化界面润滑和减摩分析

图 3-21 刀具织构化低温铣削机理

3.4 本章小结

本章通过增材制造钛合金单因素铣削试验,以 PCD 刀具和 PCD 织构化刀具作为刀具材料,在改变铣削深度和每齿进给量的参数下,针对 PCD+干式铣削、PCD 织构+干式铣削、PCD+低温铣削和 PCD 织构+低温铣削四种组合条件,分析 PCD 和 PCD 织构化刀具分别在不同组合条件下对铣削力和刀具表面黏结等的影响。具体总结如下:

(1) 仅改变铣削深度时,相对 PCD 常规刀具,PCD 织构化刀具干铣削下的主铣削力更高,PCD 织构化刀具在低温 CO_2 冷却润滑下的主铣削力降幅达 16.80-40.00%;与常规 PCD 刀具和 PCD 织构刀具干铣削相比,其相同刀具低温铣削合力 F_r 分别降低约 8.00-23.30%和 68.00-75.20%;与常规 PCD 刀具干铣削相比,在低温 CO_2 冷却润滑下,常规 PCD 刀具和 PCD 织构刀具表面抗黏结性能更好。

(2) 仅改变每齿进给量时,在干式条件下,PCD 刀具各方向上的铣削力(F_x 、 F_y 和 F_z)要比 PCD 织构化刀具小;与 PCD 刀具干式铣削相比,相同刀具低温铣削的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 降幅分别为 15.58-64.39%、33.09-60.13%和 31.65-59.19%;在低温 CO_2 冷却润滑条件下,与 PCD 常规刀具相比,PCD 织构化刀具的铣削合力幅度下降 27.98-53.99%;相对于 PCD 织构刀具干式铣削,相同刀具低温铣削的铣削合力下降 74.67-84.78%。

(3) 在干式条件下,刀具织构化对表面粗糙度产生不利影响,而在低温冷却条件下,对降低表面粗糙度有着改善趋势。同时,与传统锻造钛合金切屑不同,增材制造钛合金切屑宏观形态主要为非连续的短和断碎切屑,这有助于减少刀具与切屑的缠结和摩擦。

(4) 综上试验结果表明,PCD 刀具织构化复合低温 CO_2 冷却润滑介质降力效果显著,且低温 CO_2 冷却润滑条件能显著改善不同类型刀具表面黏结。刀具织构化对铣削力的改善主要归因于:在低温 CO_2 冷却条件下,刀具织构的置入一方面降低了刀-屑接触长度,另一方面起到了储液和润滑效果。

第4章 PCD 常规刀具低温铣削试验

为探究刀具不同前角和低温 CO_2 冷却润滑条件对增材制造钛合金切削特性的影响,本章选用 PCDR 刀具作为刀具材料,仅改变每齿进给量 $0.01\text{-}0.04\text{ mm/z}$,分别在干式和低温 CO_2 润滑条件下,针对增材制造钛合金试件进行铣削试验研究,并与第3章 PCD 刀具试验结果进行对比分析,并分析其作用机理。

4.1 不同润滑条件下铣削力分析

4.1.1 PCDR 干式和低温下铣削力分析

图 4-1(a)-(d)分别为 PCDR 在干式和低温 CO_2 冷却润滑条件下的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 和合力 F_r , 铣削力详细数据如表 4-1 所示。

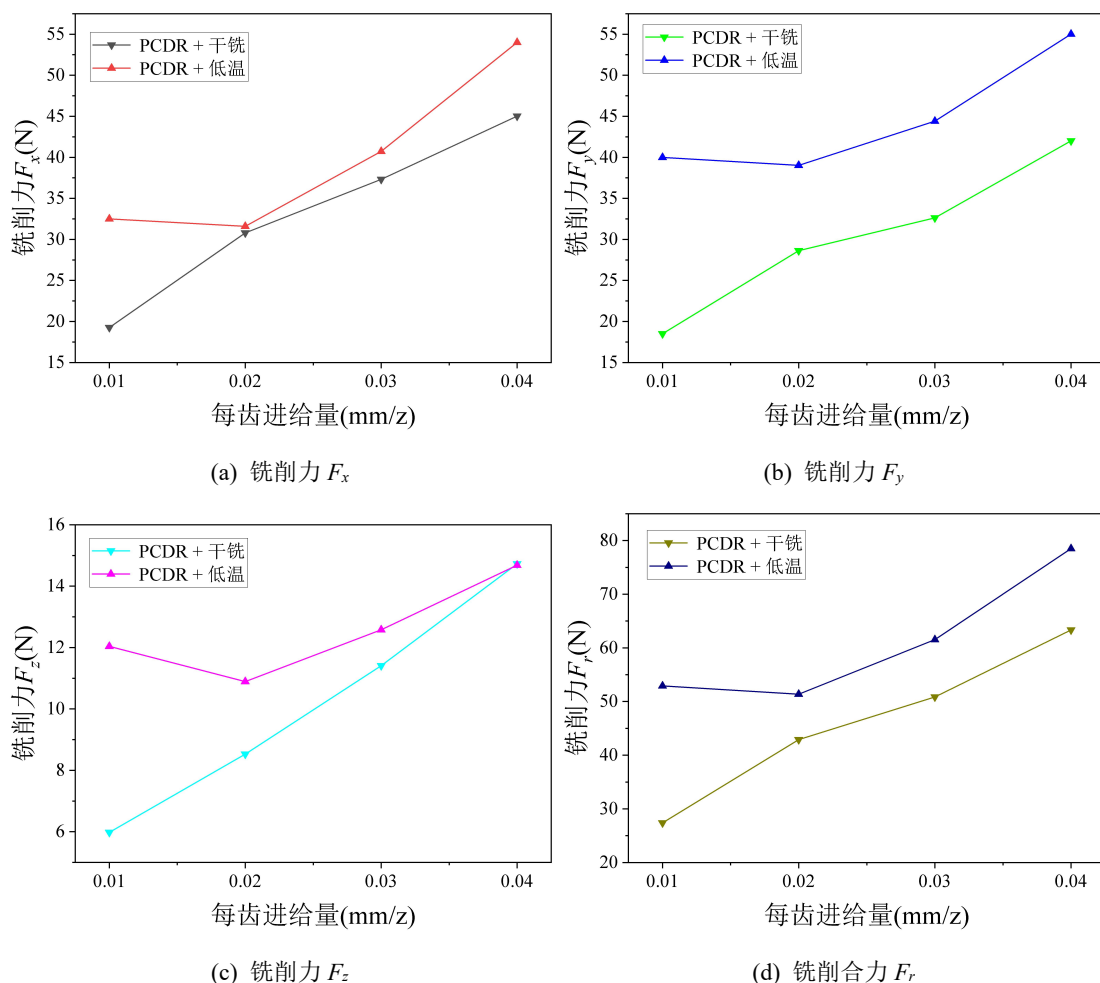


图 4-1 PCDR 干式和低温铣削力对比

根据图 4-1 曲线变化可以分析,当每齿进给量从 0.01 mm/z 增大到 0.04 mm/z

时，从整体上看，PCDR 刀具在干式和低温铣削条件下的铣削力 F_x 、 F_y 和 F_z 和 F_r 整体都呈增大趋势。进一步分析可知，在相同的进给量下，PCDR 刀具低温铣削的铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 和 F_r 均大于干式铣削的铣削力。根据图 4-1 和表 4-1 中数据分析得出，相较于干式条件，低温铣削下的 F_z 增幅较小， F_x 、 F_y 和 F_r 具有较为明显的增长趋势，其增加幅度分别为 2.56-68.60%、30.97-116.16% 和 19.77-93.28%。

表 4-1 PCDR 铣削力数据

切削方式	每齿进给量 (mm/z)	铣削力 F_x (N)	铣削力 F_y (N)	铣削力 F_z (N)	合力 F_r (N)
PCDR+干铣 削	0.01	19.27	18.50	5.98	27.38
	0.02	30.80	28.62	8.53	42.90
	0.03	37.32	32.62	11.41	50.86
	0.04	45.02	42.01	14.73	63.32
PCDR+低温 铣削	0.01	32.49	39.99	12.04	52.92
	0.02	31.59	39.03	10.89	51.38
	0.03	40.72	44.40	12.58	61.54
	0.04	54.01	55.02	14.68	78.48

4.1.2 PCD 和 PCDR 干式下铣削力分析

图 4-2 为 PCD 和 PCDR 刀具在干式下的铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 和合力 F_r 对比曲线，随着每齿进给量的增加，PCD 刀具干式铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 和合力 F_r 的变化范围为 56.03-105.68 N、38.63-70.18 N、14.80-25.32 N 和 69.65-128.96 N，PCDR 刀具干式铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 和 F_r 变化范围为 19.27-45.02 N、18.50-42.01 N、5.98-14.73 N 和 27.38-63.32 N。

从图 4-2 可以看出，在恒定每齿进给量条件下，PCDR 刀具在干式铣削过程中产生的 F_x 、 F_y 、 F_z 以及合力 F_r 均显著低于 PCD 刀具的铣削力，其下降幅度分别为 55.47-65.61%、29.73-52.11%、36.48-60.93% 和 50.90-60.69%。结果表明，在干式铣削条件下，铣削参数一定时，相较于 PCD 刀具，PCDR 刀具的铣削力更小，这对于提高增材制造钛合金干式铣削过程中的稳定性以及减少刀具磨损具有重要意义。

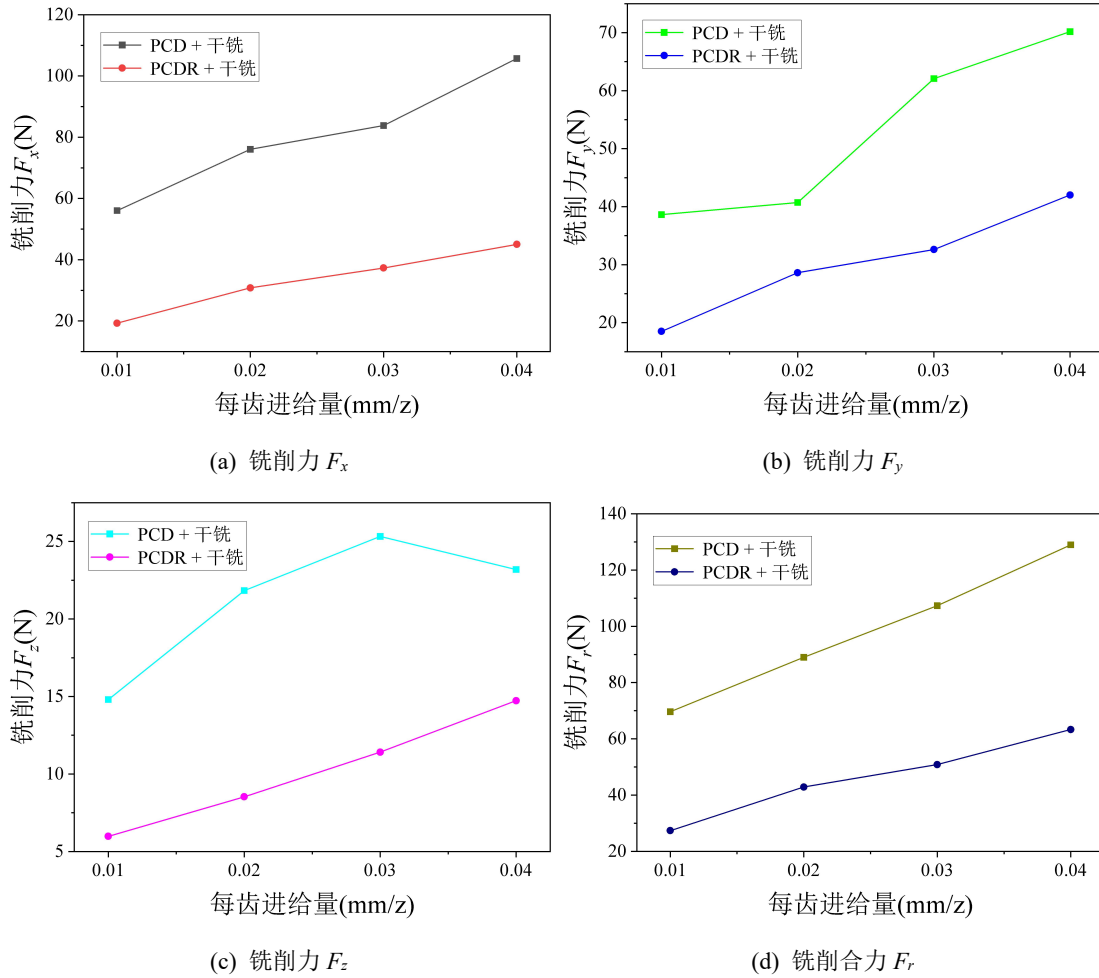


图 4-2 PCD 和 PCDR 干式铣削力对比

4.1.3 PCD 和 PCDR 低温下铣削力分析

图 4-3 展示了 PCD 与 PCDR 刀具在低温 CO_2 冷却条件下，铣削力分量(F_x 、 F_y 、 F_z)及合力 F_r 的对比曲线，随着每齿进给量的递增，PCD 刀具的低温铣削力分量(F_x 、 F_y 、 F_z)及合力 F_r 的测量值区间分别为 19.95-89.21 N、15.40-46.96 N、6.04-15.85 N 和 25.92-102.05 N，PCDR 刀具低温铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 和 F_r 的测量值区间分别为 31.59-54.01 N、39.03-55.02 N、10.89-14.68 N 和 51.38-78.48 N。

从图 4-3 能够分析出，在低温冷却条件下，随着每齿进给量增大时，PCDR 刀具的铣削力分量 F_y 较 PCD 刀具显著提升，增幅范围为 17.16-159.68%。而在每齿进给量为 0.01 mm/z 时，PCDR 刀具的铣削力 F_x 、 F_z 和 F_r 要高于 PCD 刀具切削力，分别增大了 62.86%、99.34%和 104.17%；在每齿进给量为 0.02-0.04 mm/z 时，PCDR 刀具的铣削力 F_z 呈现略低于 PCD 刀具的趋势， F_x 和 F_r 较 PCD 刀具也有所下降，其下降幅度分别为 38.86-42.09%和 12.86-23.24%。

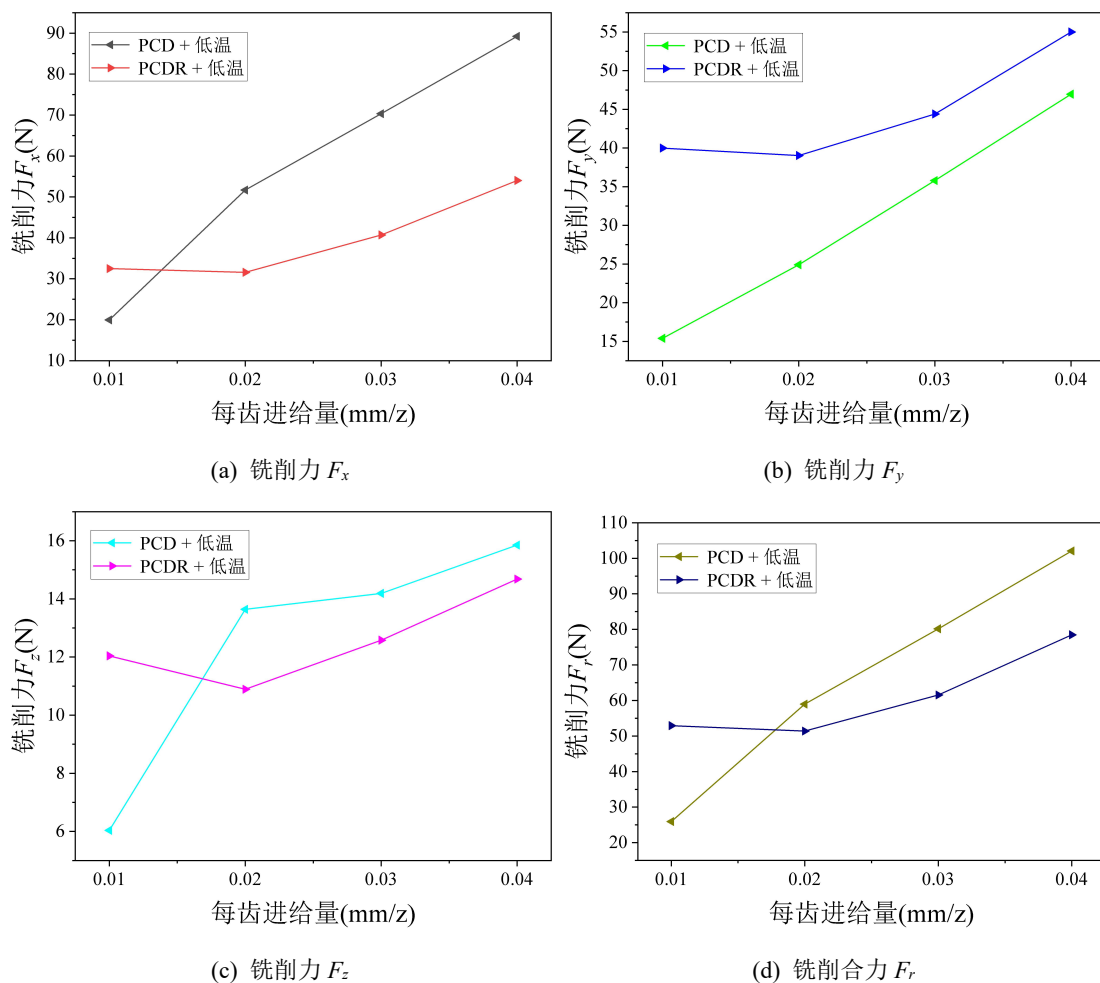


图 4-3 PCD 和 PCDR 低温铣削力对比

4.2 不同润滑条件下表面粗糙度分析

4.2.1 不同润滑下粗糙度和形貌分析

本试验中对干式和低温 CO_2 两种条件下铣削槽底部进行粗糙度测量，每个槽选取三块不同区域，取其平均值作为结果来评价。测量结果如表 4-2 和 4-3 所示（表中槽 1、2、3 和 4 分别表示每齿进给量为 0.01、0.02、0.03 和 0.04 mm/z 下的铣削槽）。

表 4-2 PCDR+干式下表面粗糙度

	第一次	第二次	第三次	平均值/ μm
槽 1	0.112	0.143	0.112	0.122
槽 2	0.184	0.169	0.187	0.180
槽 3	0.223	0.276	0.276	0.258
槽 4	0.264	0.417	0.293	0.325

表 4-3 PCDR+低温下表面粗糙度

	第一次	第二次	第三次	平均值/ μm
槽 1	0.253	0.249	0.210	0.237
槽 2	0.310	0.301	0.334	0.315
槽 3	0.371	0.315	0.275	0.320
槽 4	0.412	0.390	0.387	0.396

图 4-4 为在干式和低温二氧化碳冷却润滑条件下，PCDR 刀具铣削增材制造钛合金的铣槽表面粗糙度变化曲线。从图 4-4 中可以看出，在相同进给量下，相较于干式条件，低温 CO_2 下的粗糙度明显更大，这与其铣削力结果一致。

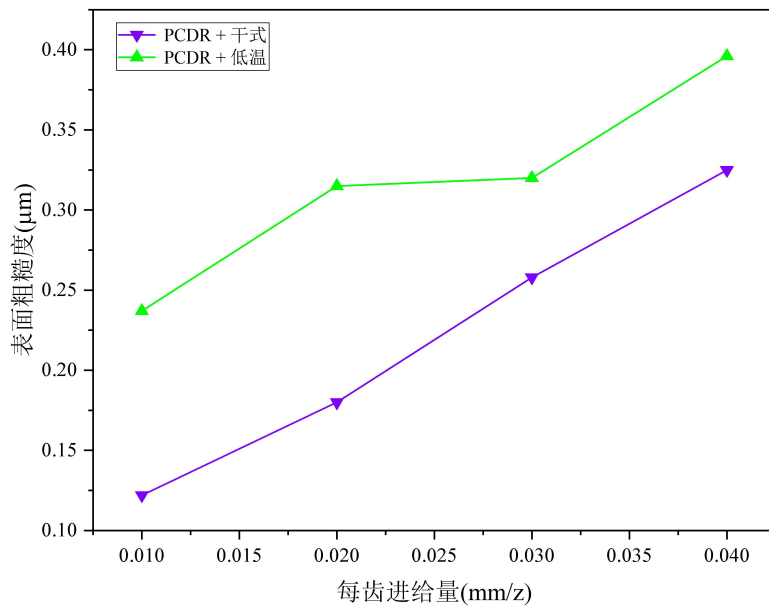


图 4-4 不同润滑条件下粗糙度

图 4-5 和图 4-6 分别为扫描电子显微镜所拍摄的干式和低温 CO_2 润滑下的铣槽底部形貌，图中能够清晰看出，不同的加工条件对加工表面质量具有显著影响，表现出不同的形貌特征。

如图 4-5 所示，在干式铣削下，槽底表面整体呈现较为均匀光滑的铣削纹理，有轻微的碎屑黏附，未见明显的撕裂凹坑现象，刀具进给方向上存在微量划痕，并且随着每齿进给量的增大，槽底的加工纹理逐渐增强，但整体表面并未出现显著劣化。这归因于在干式条件下，由于 PCDR 刀具前角较大，增材制造钛合金材料更容易被铣削分离，切屑排出更加流畅，因而表面质量较好。

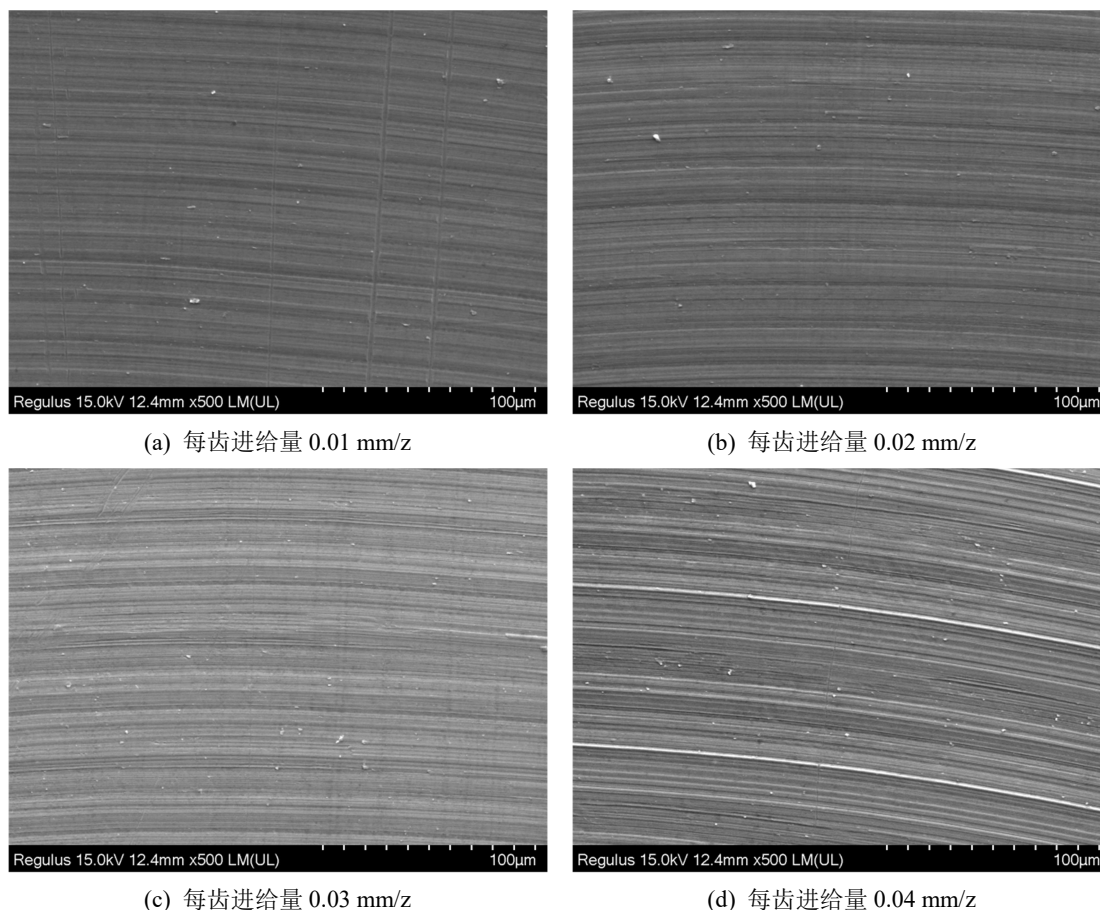


图 4-5 干式铣槽电镜形貌图

而从图 4-6 展示的结果可以分析出,与干式下结果不同,低温 CO_2 铣削下的槽底表面呈现一定的不均匀性,表面存在很多裂纹凹坑,存在明显的材料堆积、撕裂以及碎屑黏附现象,表面损伤更为显著。造成这一结果的原因可能是:一方面,相较于干式下,低温 CO_2 会降低增材制造钛合金材料的塑性使其硬度增大,脆性增强,PCDR 刀具刃口对工件产生更集中的剪切作用,易导致微裂纹产生和剥落。另一方面,与传统锻造钛合金不同,增材制造钛合金因其独特的金相组织,材料内部具有明显的各向异性和微孔隙缺陷,在低温 CO_2 下塑性变形能力减弱。加之 PCDR 刀具刃口特征,应力集中效应更加明显,微孔隙演化为微裂纹,导致表面损伤加剧。

综上试验结果显示,对于 PCDR 刀具铣削增材制造钛合金试验中,随着每齿进给量的改变,干式铣削均能保持较好的表面质量,而低温 CO_2 铣削造成更多的表面缺陷和碎屑黏附。

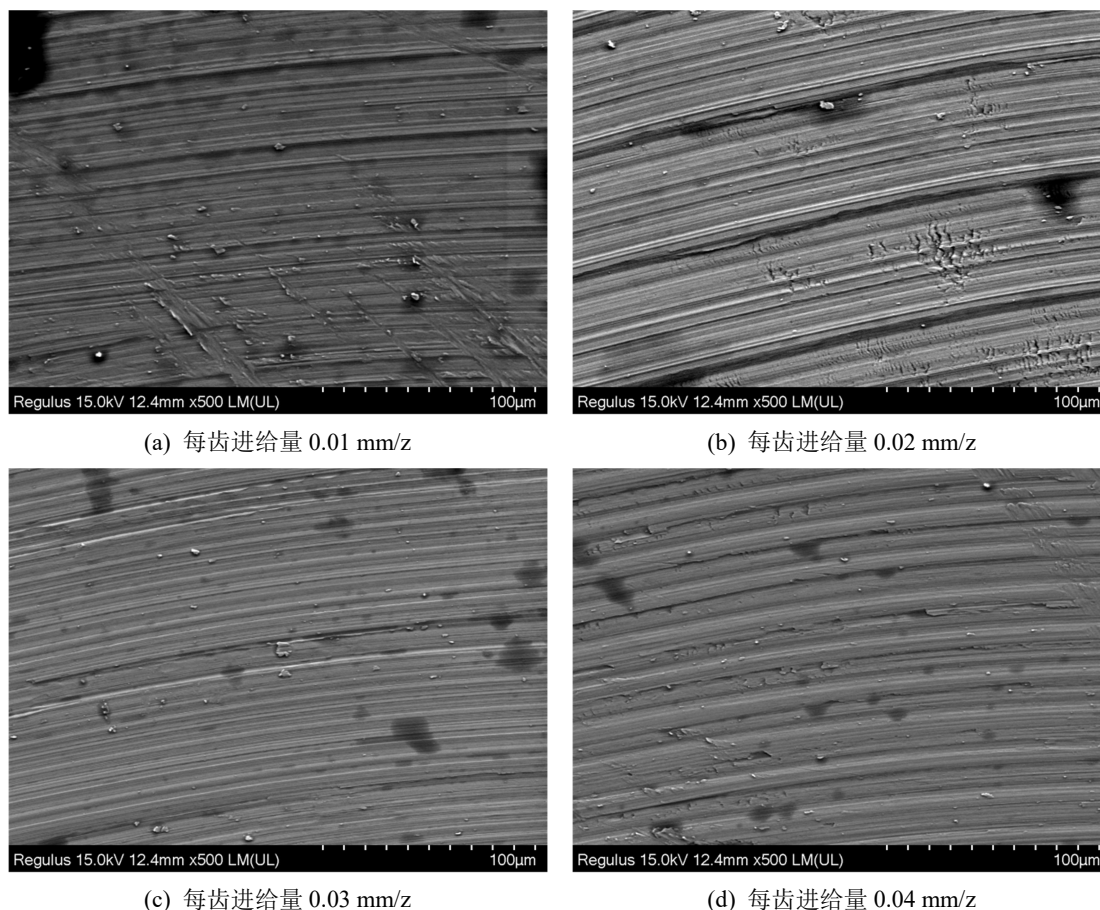
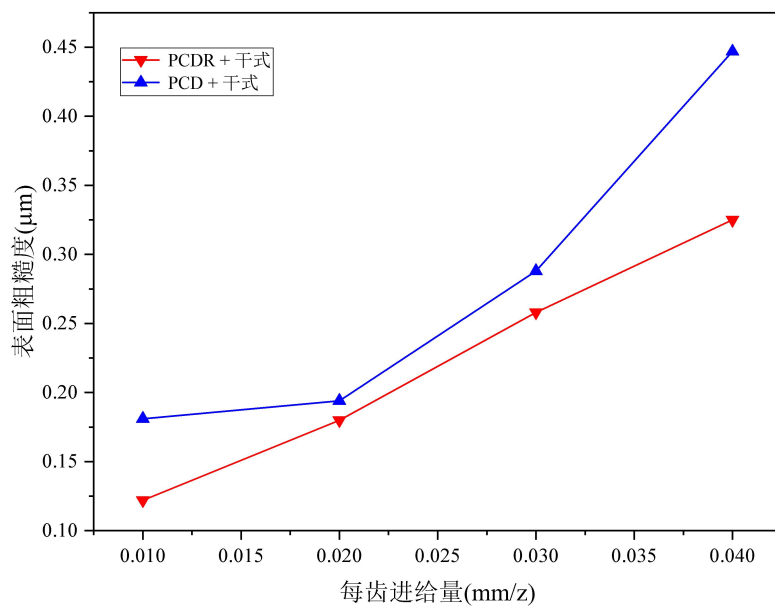


图 4-6 低温铣槽电镜形貌图

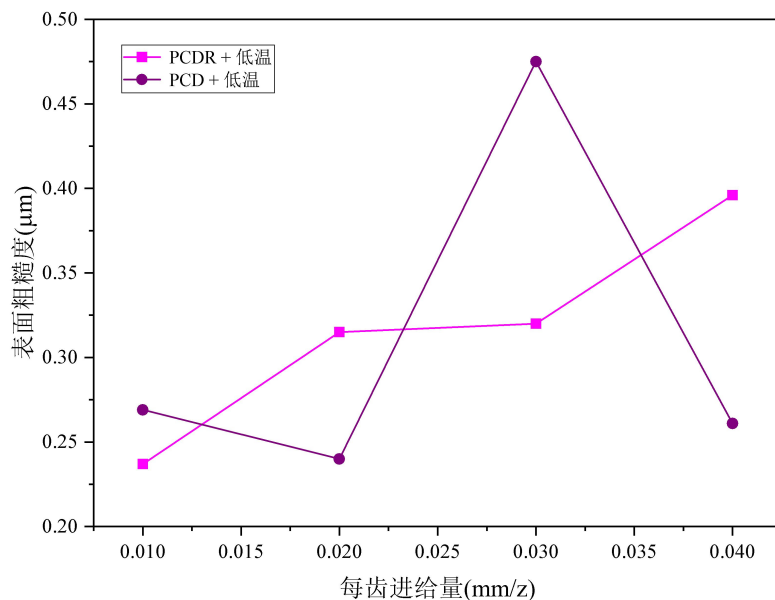
4.2.2 刀具前角对表面粗糙度的影响

图 4-7(a)和(b)分别为在干式和低温 CO_2 下, PCDR 刀具和 PCD 刀具下的表面粗糙度随每齿进给量变化的对比曲线。从图 4-7 中可以分析, 在干式铣削条件下, 随着每齿进给量的增大, PCDR 刀具加工后的槽底表面粗糙度优于 PCD 直刃刀具, 这主要归因于相对于 PCD 直刃刀具, PCDR 刀具前角的增大, 使得刀具的作用力方向更趋向于铣削运动, 而非挤压作用, 这种优化的力作用方向有效降低了工件表面的残余应力分布, 从而改善了铣槽底部的表面质量, 因此粗糙度更低。

在低温 CO_2 冷却条件下, 随着每齿进给量的逐渐增加, 两种刀具铣削后的槽底表面粗糙度呈现不同的变化趋势: PCDR 刀具加工后的粗糙度趋于稳定增大, 而 PCD 直刃刀具铣削后的槽底粗糙度表现出不稳定的波动特征。



(a) 干式下粗糙度对比



(b) 低温下粗糙度对比

图 4-7 粗糙度对比

造成这一现象的原因可能归因于：一方面，在低温 CO_2 冷却下，增材制造钛合金工件硬化导致脆性增加，并且随着每齿进给量的增加，PCDR 刀具产生的铣削力也在逐渐增大，而较大的前角能够实现更平稳的材料去除过程，进而导致槽底粗糙度呈现稳定上升规律。另一方面，相对于 PCDR 刀具，PCD 直刃刀具因其较小的前角不仅造成铣削区域低温冷却相对分布不均，还导致铣削过程中的挤压效应尤为显著，从而导致槽底粗糙度呈不稳定波动特征。

4.3 低温对 PCDR 刀具表面黏结的影响

图 4-8 为 PCDR 刀具前刀面表面黏结情况和 EDX 成分分析。如图 4-8(a)所示,在刀具表面选择刀-屑区域(图中谱图 13 区域),其 EDX 分析结果如图 4-8(b)所示。可以看出,该区域主要元素为钛(Ti)、碳(C)和氧(O)元素,可以证明该区域黏结物为增材制造钛合金材料。

图 4-8(c)和(d)分别展示了干式和低温 CO_2 冷却润滑条件下 PCDR 刀具前刀面表面黏结形貌特征,由图 4-8(c)能够看出,干式条件下刀具前刀面不仅有大面积的黏结堆积,而且可观察到尺寸较大的块状切屑附于刀具表面。相比之下,观察图 4-8(d)可知,低温 CO_2 下的表面黏结情况得到显著改善,不仅黏结区域小,而且相对于干式下刀具表面黏附的块状切屑,低温 CO_2 下刀具表面黏附的切屑均呈细小碎屑状。结果表明,低温 CO_2 能够有效抑制刀-工间的界面扩散,有效改善刀具表面黏结。

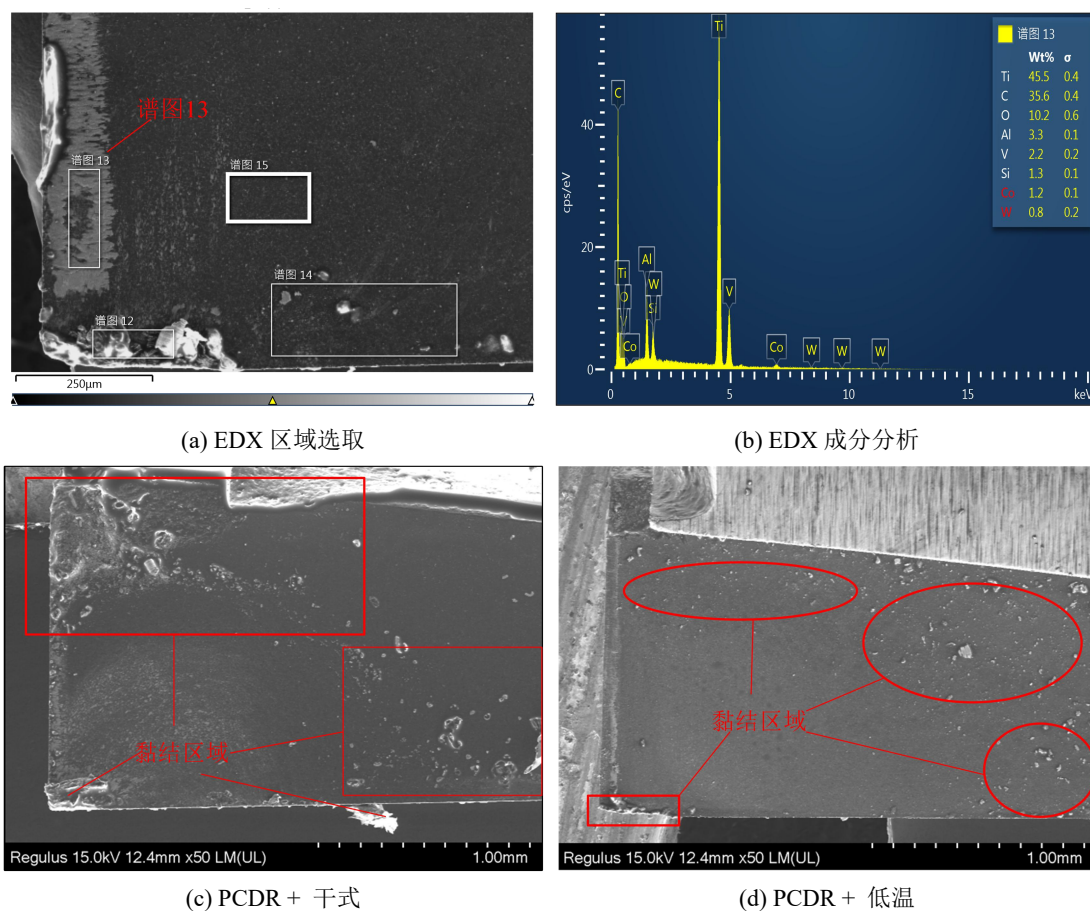


图 4-8 PCDR 刀具表面黏结情况

4.4 干式下增材制造钛合金切屑形态分析

图 4-9(a)-(d)分别展示了在干式切削条件下,PCDR 刀具铣削增材制造钛合金时,不同每齿进给量(0.01、0.02、0.03 和 0.04 mm/z)对应的切屑形貌。能够看出,在不同进给量下,切屑形态均呈现卷曲螺旋状,这与 PCDR 刀具的几何形状有关,在铣削过程中可以降低铣削变形,从而导致切屑呈卷曲状态。在每齿进给量 0.01 mm/z 和 0.02 mm/z 时,切屑呈卷曲长条状,而在 0.03 mm/z 和 0.04 mm/z 时,切屑形态呈更加紧密的 C 型螺旋状。这归因于在每齿进给量 0.01 mm/z 和 0.02 mm/z 时,进给量较小,切屑较薄,并且弯曲变形较小,从而呈现松散的卷曲长条状;而在 0.03 mm/z 和 0.04 mm/z 时,进给量较大,切屑变厚,切屑受到更强的挤压和弯曲作用,从而形成更加紧密的 C 型螺旋状。

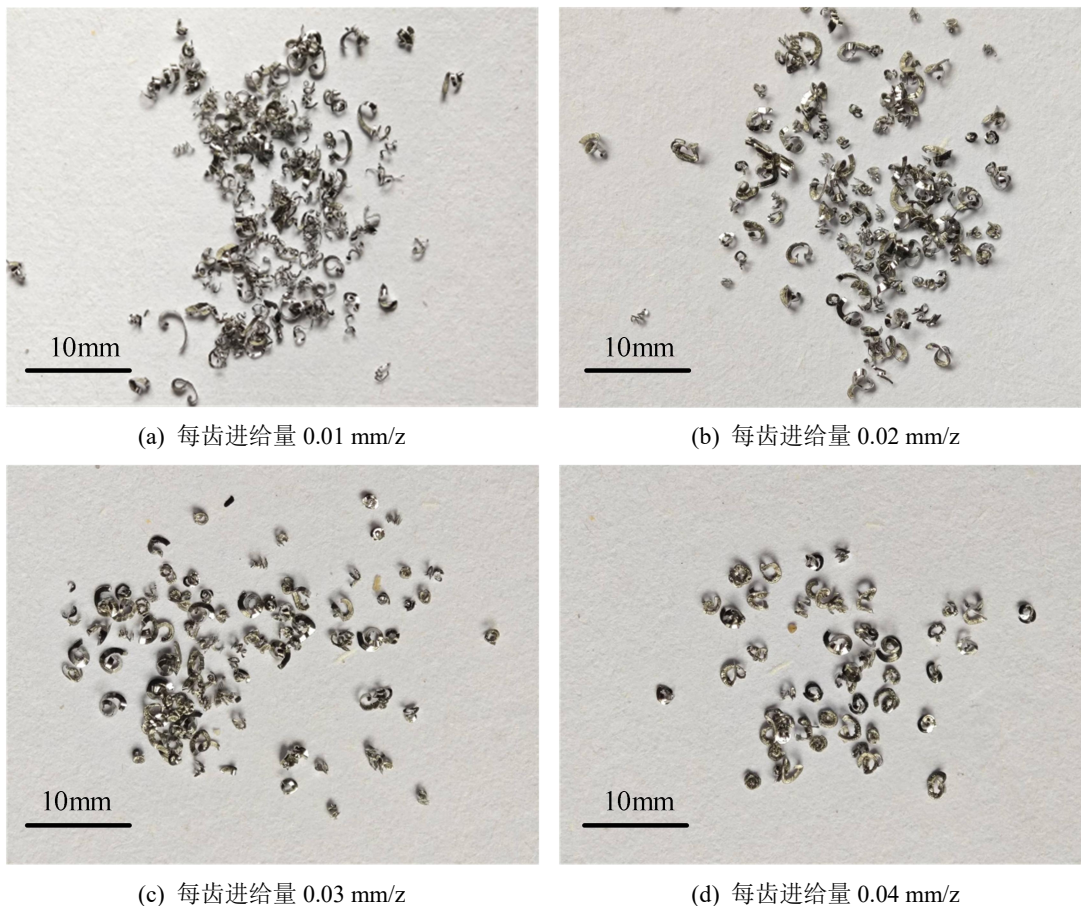


图 4-9 干式下切屑形态分析

4.5 铣削力机理讨论和分析

本章试验结果表明,随着每齿进给量的增加,在干式条件下,PCDR 刀具的

铣削力均小于 PCD 刀具，而在低温 CO₂ 下，PCDR 刀具的铣削合力整体上大于 PCD 刀具。这可能归因于下述方面：

在干式条件下，由于刀具前角的增大，刀-屑的接触面积减小，导致摩擦系数降低，从而显著降低铣削力。而在低温 CO₂ 冷却润滑下，一方面，相对于 PCDR 刀具，PCD 刀具前刀面较为平坦，低温对其影响较小，而 PCDR 刀具因其前角较大，且切削刃较锋利，局部承载能力较弱，使得铣削力分布和传递方式发生变化；另一方面，低温 CO₂ 显著影响了刀-工间的摩擦特性，PCDR 刀具由于其几何特征更容易发生微观黏附，导致铣削过程中的摩擦力增大，从而使得铣削力增大。

此外，与 PCD 刀具试验结果不同，PCDR 干式铣削力小于 PCDR 低温铣削力，主要可能原因分析如下：

首先，相对于低温 CO₂ 冷却润滑方式，干式铣削条件下的铣削接触界面的摩擦程度更加剧烈，刀-屑界面能够产生更高的摩擦温度，从而利于更好软化被加工材料，易于铣削；其次，相对于干式加工，试验过程中供应的低温 CO₂ 润滑介质产生的气体压力，一定程度上能够导致刀具表面压力的增大，从而可能导致刀具铣削力的增大；最后，相对于干式加工，低温 CO₂ 不仅抑制增材制造钛合金的软化效应，而且能够材料硬度和脆性增加，一定程度上易于导致铣削力上升^[36,80]。

综上所述，在上述三方面综合作用下，可能导致了低温条件下的 PCDR 低温铣削力高于相同刀具干式条件下的铣削力。

4.6 本章小结

本章以 PCDR 刀具作为刀具材料，在干式和低温 CO₂ 冷却润滑下，开展不同进给量下增材制造钛合金铣削试验，探究刀具前角和低温冷却润滑对铣削力、表面质量、刀具表面黏结以及切屑形态的影响，并与 PCD 刀具铣削试验结果进行对比分析。试验结果如下：

(1) 当每齿进给量从 0.01 mm/z 增大到 0.04 mm/z 时，PCDR 刀具干式铣削和低温铣削的铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 和 F_r 都呈增大趋势，并且相对于干式条件，低温下的铣削合力 F_r 增加幅度为 19.77-93.28%。

(2) 在进给量相同时, 通过 PCDR 刀具铣削力和 PCD 刀具铣削力对比分析得出, 在干式条件下, PCDR 干式铣削力 F_x 、 F_y 、 F_z 和合力 F_r 均小于 PCD 刀具铣削力, 其中合力 F_r 下降幅度达 50.90-60.69%; 在低温 CO_2 冷却润滑条件下, PCDR 低温铣削力 F_r 下降 12.86-23.24%。

(3) 通过测量 PCDR 刀具铣削增材制造钛合金试件后得到的槽底表面粗糙度, 得到如下结果, 相较于干式条件, 低温 CO_2 下的粗糙度更大, 并且在干式条件下, PCDR 刀具下的槽底表面粗糙度小于 PCD 刀具。同时通过电镜形貌可以观察到, 干式铣削下的槽底表面整体较为光滑, 而低温 CO_2 铣削下的槽底表面存在很多裂纹凹坑。

(4) 与 PCD 刀具铣削试验结果一致, 低温 CO_2 下 PCDR 刀具表面黏结情况较好, 而干式下表面黏结较严重。在每齿进给量 0.01 mm/z 和 0.02 mm/z 时, PCDR 刀具铣削后的切屑呈卷曲长条状, 在 0.03 mm/z 和 0.04 mm/z 时, 切屑形态呈更加紧密的 C 型螺旋状。

第 5 章 总结与展望

5.1 全文总结

本文分别在干式和低温 CO_2 条件下, 以 PCD 织构化刀具铣削增材制造钛合金过程中的铣削力、表面粗糙度以及刀具表面黏结作为主要研究对象, 采用单因素试验与加工理论分析相结合的方法, 探讨了不同类型刀具 (PCD 刀具、PCD 织构化刀具以及 PCDR 刀具) 在不同铣削条件下的铣削性能, 揭示了刀具织构化复合低温 CO_2 冷却润滑下的铣削机理。总结如下:

(1) 在干铣削和 CO_2 低温冷却润滑下, 应用常规 PCD 刀具和 PCD 织构化刀具开展铣削性能对比研究, 分析在不同铣削深度下, 刀具织构化和低温冷却润滑对主铣削力和刀具表面黏结的影响。结果表明, 相对于其它组合条件, 低温 CO_2 冷却润滑复合 PCD 织构刀具均能够降低主铣削力, 且应用低温 CO_2 冷却润滑下能够有效提高刀具表面的抗黏结性能。其中, 相对于 PCD 织构化刀具干式铣削工况, 相同刀具低温冷却润滑下的主铣削力降低幅度约 65.70-75.30%, 显著降低铣削力。

(2) 在变每齿进给量下, 分别开展了干式和低温 CO_2 冷却润滑下的 PCD 刀具和 PCD 织构化刀具铣削试验。试验结果表明, 在干式条件下, 刀具织构化对表面粗糙度产生不利影响, 而在低温冷却条件下, 一定程度上对降低表面粗糙度具有改善效果。与常规刀具相比, 刀具织构化复合低温 CO_2 不仅表现出更好的表面抗黏结性能, 而且降力效果显著, 且 PCD 织构化刀具的铣削合力相较于 PCD 刀具, 幅度下降 27.98-53.99%, 有效降低铣削力。随着进给速度的增加, 产生的切屑宏观形态逐渐增大, 且宏观切屑形态大多是较短的断续切屑。

(3) 以带前角的 PCD 刀具(PCDR)作为刀具材料, 仅改变每齿进给量, 分别在干式和低温 CO_2 条件下开展铣削对比试验, 并与 PCD 直刃 (前角为 0°) 刀具铣削试验结果进行对比与分析。试验结果显示, PCDR 低温下的铣削力高于干式下的铣削力, 其低温铣削下的 F_z 增幅较小, 而 F_x 、 F_y 和 F_r 具有较为明显的增长趋势, 其增加幅度分别为 2.56-68.60%、30.97-116.16%和 19.77-93.28%。并且 PCDR 干式铣削力小于 PCD 干式铣削力, 低温铣削合力较 PCD 低温铣削合力也有所下降。

(4) 相较于干式条件,PCDR 低温 CO_2 下的粗糙度更大,并且在干式条件下,PCDR 刀具下的槽底表面粗糙度小于 PCD 刀具;在每齿进给量为 0.01 mm/z 和 0.02 mm/z 时,PCDR 刀具铣削后的切屑呈卷曲长条状,而在 0.03 mm/z 和 0.04 mm/z 时,切屑形态呈更加紧密的 C 型螺旋状。

5.2 研究展望

本文针对增材制造钛合金材料,在干式加工和低温润滑条件下,开展了常规刀具和组织化刀具铣削试验研究和分析,并取得了一些有价值的试验结果。目前,刀具组织化应用于增材制造钛合金难加工材料切削加工中,仍处于起步和探索阶段,有待后续进一步完善和提高,本文仍有不足之处,具体如下:

(1) 由于试验现场条件的限制,并没有对铣削过程中的温度进行测量,后续可通过测量铣削温度,并结合铣削力测量、刀-屑界面摩擦系数、刀具表面黏结、切屑形态及化学成分分析,全面分析不同条件下的刀具摩擦学特性及行为,为刀-屑界面摩擦磨损改善和刀具快速磨损的抑制提供依据。

(2) 本文仅针对刀具表面沟槽组织和常规刀具开展试验对比,对刀具组织形状、尺寸及分布特征变化尚未开展,后续可以进一步深入研究不同润滑条件和切削工艺参数对刀具组织特征参数对钛合金铣削性能的影响,为铣削条件下的刀具组织化设计、优化及基础模型构建,奠定理论依据。

参考文献

- [1] GU DD, SHI XY, POPRAWA R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. Science, 2021, 372(6545): 1-15.
- [2] 刘景博, 刘世锋, 杨鑫, 等. 金属增材制造技术轻量化应用研究进展[J]. 中国材料进展, 2020, 39(02): 163-168.
- [3] 赵丹妹, 王春仁, 韩倩倩, 等. 3D 打印医用钛合金植入物的研究现状与进展[J]. 中国医疗器械信息, 2017, 23(03): 1-5+15.
- [4] 林琬淳, 杨济硕, 杨国溪, 等. 面向增材制造的汽车轴承支座轻量化设计[J]. 桂林电子科技大学学报, 2023, 43(04): 259-264.
- [5] 张明, 孙中刚, 郭艳华, 等. 3D 打印连续纤维增强树脂基复合材料的研究进展[J]. 材料工程, 2025, 53(02): 50-70.
- [6] 田国良, 邱飞, 毕永强, 等. 基于工艺参数的熔融沉积尺寸偏差建模方法[J]. 塑料, 2025, 54(01): 69-74.
- [7] 刘怀举, 卢泽华, 朱才朝. 塑料齿轮传动高承载技术发展与应用[J]. 中国机械工程, 2025, 36(01): 2-17.
- [8] LI GX, CHANDRA S, RAHMAN RRA, et al. Machinability of additively manufactured titanium alloys: A comprehensive review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 75: 72-99.
- [9] AL-RUBAIE KS, MELOTTI S, RABELO A, et al. Machinability of SLM-produced Ti6Al4V titanium alloy parts[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 768-786.
- [10] 高航, 彭灿, 王宣平. 航空增材制造复杂结构件表面光整加工技术研究及进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(9): 14-22.
- [11] 王森, 董海, 谷雨, 等. 聚晶金刚石刀具研磨质量及去除机理研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(04): 467-472.
- [12] 尹慧明, 纠永涛, 赵亦嘉, 等. 聚晶立方氮化硼刀具切削 QT700 球墨铸铁试验研究[J]. 机械制造, 2024, 62(12): 52-56.
- [13] ZHA J, CAI ZY, PENG XF, et al. Nickel-based alloy efficient milling with

- ceramic tool and experimental verification in closed impeller[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2025, 239(5): 1663-1676.
- [14] PLOTNIKOV S.A., CHEREMISINOV P.N., KLUONIS A.S., et al. Composition of the Hardened Surface of a Carbide Cutting Tool[J]. Russian Engineering Research, 2024, 44(4): 534-536.
- [15] 单东方, 申桂鑫, 彭善龙, 等. 钛双极板表面碳掺杂氮化钛耐腐蚀涂层制备[J]. 稀有金属与硬质合金, 2023, 51(01): 86-91.
- [16] 陈亚奋, 王晓琴, 惠瑜. HiPIMS 制备高性能 TiCN 涂层[J]. 金属加工(冷加工), 2024, (01): 73-75+80.
- [17] 陈诚, 负庆芳, 郭凯, 等. 表面等离子渗氮对 TiAlN 涂层 TiCN 基金属陶瓷性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2024, 52(05): 68-75+102.
- [18] 刘源, 丁继成, 许雨翔, 等. 电弧离子镀和高功率脉冲磁控溅射 AlTiN 涂层及其切削性能研究[J]. 表面技术, 2022, 51(02): 57-65.
- [19] 唐紫妍, 魏菁, 陈仁德, 等. 类金刚石碳基涂层热稳定性研究进展[J]. 表面技术, 2024, 53(20): 1-18.
- [20] 陈彦军, 王顺花, 蒲吉斌, 等. 多弧离子镀制备氮化铬基涂层及其摩擦学性能研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(03): 48-54+109.
- [21] 司婷婷, 朱丽慧, 刘庆露. TiN/MT-TiCN/Al₂O₃/TiOCN 多层涂层的热稳定性研究[J]. 硬质合金, 2022, 39(02): 102-110.
- [22] 杨树财, 韩佩, 佟欣, 等. 刀具介观几何特征成形技术及其作用研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(5): 317-351.
- [23] 刘安南, 刘战强, 蔡士祥, 等. 切削加工车削刀具断屑装置及技术研究综述[J]. 机械工程学报, 2024, 60(7): 334-349.
- [24] 许文昊, 李长河, 张彦彬, 等. 静电雾化微量润滑研究进展与应用[J]. 机械工程学报, 2023, 59 (7): 110-135.
- [25] 王德祥, 张宇, 江京亮, 等. 离子液基和棕榈油基纳米流体在镍基高温合金微量润滑磨削界面的摩擦学机理研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(19): 159-171.
- [26] YAN B, CHEN N, ZHU Y, et al. Instantaneous formation of covalently bonded diamond-graphite-graphene with synergistic properties[J]. International Journal

- of Machine Tools and Manufacture, 2023, 193: 1-18.
- [27] AGRAWAL C, WADHWA J, PITRODA A, et al. Comprehensive analysis of tool wear, tool life, surface roughness, costing and carbon emissions in turning Ti-6Al-4V titanium alloy: Cryogenic versus wet machining[J]. Tribology International, 2021, 153: 1-18.
- [28] HA SJ, LIM DW, KIM JH, et al. Economic evaluation and machining performance in Ti-6Al-4V titanium alloy milling by integrated CO₂ & MQL injection system[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35 (9): 4135-4142.
- [29] JIA SL, HAN J, LIU YD, et al. Comparative study on cutting performance of different micro-texturing milling tools for preparing the L-PBF-formed TC4 workpieces[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 108(22): 596-609.
- [30] 马晶, 张明鉴, 刘强, 等. 仿生刀具研究进展综述[J]. 机械工程学报, 2022, 58 (13): 261-281.
- [31] 戎杰, 牛秋林, 高航, 等. 钛合金铣削加工中 MQL 参数优化与切削性能研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(03): 106-114.
- [32] KUMAR MG, P. N, ERDI MK, et al. Comparison of Tool Wear, Surface Morphology, Specific Cutting Energy and Cutting Temperature in Machining of Titanium Alloys Under Hybrid and Green Cooling Strategies[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2023, 10(6): 1393-1406.
- [33] PEI SH, XUE F, ZHOU YF, et al. Effects of cryogenic gas jet cooling on milling surface roughness and tool life for GH4169 alloy additive manufacturing parts[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 86: 266-281.
- [34] 赵香港, 郝秀清, 章梓航, 等. 低温 CO₂ 辅助 PCD 刀具硬车削轴承套圈的装置及试验研究[J]. 表面技术, 2023, 52(02): 307-316.
- [35] 李小睿, 赵威, 李浩, 等. 高压低温 CO₂ 射流冷却条件下高速车削淬硬轴承钢的试验研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(24): 2975-2985.
- [36] 吴世雄, 张文锋, 刘广东, 等. 低温液氮冷却下高速切削淬硬钢的切屑形成

- 及刀具磨损[J]. 中国机械工程, 2022, 33(05): 551-559.
- [37]AN QL, DANG JQ. Cooling Effects of Cold Mist Jet with Transient Heat Transfer on High-Speed Cutting of Titanium Alloy[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2020, 7(2): 271-282.
- [38]ZHAO W, REN F, IQBAL A, et al. Effect of liquid nitrogen cooling on surface integrity in cryogenic milling of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(2): 1497-1508.
- [39]BEJJANI R, BACHIR E, SALAME C. Advanced Manufacturing of Titanium Alloy Ti-6Al-4V by Combining Cryogenic Machining and Ultrasonic-Assisted Turning[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 33(13): 6507-6527.
- [40]JIANG QH, LI S, LIU H, et al. Material removal mechanisms in ultra-high-speed scratching of Ti6Al4V alloy by selective laser melting[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 127: 645-659.
- [41]CHEN ZW, WU X, HE LJ, et al. Effect of heat treatment on the anisotropic machinability of additive manufactured titanium alloys in micro-milling[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 32: 3318-3332.
- [42]JAFARIAN F, BAHRAMI M, FALLAH MM, et al. Numerical analysis of machinability and surface alterations in cryogenic machining of additively manufactured Ti6Al4V alloy[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2024, 134: 102961.
- [43]KHATRI N, BARKACHARY MB, SINGH S, et al. Diamond machining of additively manufactured Ti6Al4V ELI: Newer mode of material removal challenging the current simulation tools[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 120: 378-390.
- [44]DANISH M, GUPTA KM, GHAZALI MS, et al. Tool wear and surface roughness characteristics in sustainable machining of additively manufactured titanium alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024, 30: 2955-2967.

- [45]ASLANTAS K, HASÇELIK A, ERÇETIN A, et al. Effect of cutting conditions on tool wear and wear mechanism in micro-milling of additively manufactured titanium alloy[J]. Tribology International, 2024, 193: 109340.
- [46]ZHANG H, DANG JQ, MING WW, et al. Cutting responses of additive manufactured Ti6Al4V with solid ceramic tool under dry high-speed milling processes[J]. Ceramics International, 2020, 46(10): 14536-14547.
- [47]WU X, CHEN ZW, KE WC, et al. Investigation on surface quality in micro milling of additive manufactured Ti6Al4V titanium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 101: 446-457.
- [48]LI JH, SHI WT, LIN YX, et al. Comparative study on MQL milling and hole making processes for laser beam powder bed fusion (L-PBF) of Ti-6Al-4V titanium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 94: 20-34.
- [49]JAY A, HREETABH K, K. CN. Comparative analysis of tool wear in micro-milling of wrought and selective laser melted Ti6Al4V[J]. Wear, 2023, 523.
- [50]NI CB, ZHU LD, ZHENG ZP, et al. Effect of material anisotropy on ultra-precision machining of Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 848.
- [51]周云, 何玉洋, 杨泽檀, 等. 复合织构刀具切削铝合金的性能[J]. 中国表面工程, 2022, 35(03): 281-288.
- [52]方锐, 邹平, 段经伟, 等. 微织构刀具三维超声振动车削 304 不锈钢研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(12): 1761-1768.
- [53]李媛媛, 于晓, 岳修杰, 等. 刀具微织构对 6061 铝合金切削性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(02): 24-28.
- [54]叶艳秋, 胡桂领. 激光表面织构化硬质合金刀具的设计及切削加工性能研究[J]. 应用激光, 2022, 42(07): 72-78.
- [55]张硕, 邹平, 方锐, 等. 微织构车刀椭圆超声辅助切削加工性能研究[J]. 中国机械工程, 2023, 34(03): 287-291+299.
- [56]周慧琳, 于汇泳, 赵向阳. 铝合金材料切削用织构刀具性能研究[J]. 现代制

- 造工程, 2022(06): 85-89.
- [57]陈德雄, 林梦晗, 赵亚文, 等. 微织构刀具对钛合金切屑形成影响的仿真研究[J]. 宇航材料工艺, 2023, 53(05): 15-24.
- [58]PAWANR S, GUPTA K. On dry machining of AZ31B magnesium alloy using textured cutting tool inserts[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2024, 12(4): 1608-1618.
- [59]LI QH, MA CL, XIE LT, et al. Effect of Coated Composite Micro - Texture Tool on Cutting Shape and Cutting Force during Aluminum Alloy Cutting[J]. Machines, 2023, 11(4): 439.
- [60]MAENG S, ITO H, KAKINUMA Y, et al. Study on Cutting Force and Tool Wear in Machining of Die Materials with Textured PCD Tools Under Ultrasonic Elliptical Vibration[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2022, 10(1): 1-10.
- [61]王栋梁, 张继林, 易湘斌. 切削速度对微织构涂层刀具切削性能的影响[J]. 现代制造工程, 2023, (07): 106-111+159.
- [62]ZAGÓRSKI I. Surface Roughness Evaluation of AZ31B Magnesium Alloy After Rough Milling Using Tools with Different Geometries[J]. Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2024, 70(7-8): 355-368.
- [63]杨晋宁. 正交试验法在刀具几何参数优化中的应用研究[J]. 机械研究与应用, 2024, 37(03): 48-51+59.
- [64]唐海权, 巫兴胜, 张毅, 等. 基于 TOPSIS-灰色关联法的负倒棱刀口几何参数优化[J]. 工具技术, 2024, 58(10): 132-135.
- [65]李捷, 卢刚, 王乐祥, 等. 基于加工评估的特殊环境内形面车刀几何参数标准化策略[J]. 金属加工(冷加工), 2024, (10): 48-52.
- [66]胡春林. 刀具几何参数对纵扭超声振动铣削性能的影响[J]. 机械管理开发, 2024, 39(10): 83-84+87.
- [67]王贵林, 于爱兵, 邹翩, 等. 考虑铲钻刀具倒棱刀口几何参数的钻削力理论模型[J]. 兵工学报, 2023, 44(06): 1733-1743.
- [68]骆迎昕, 梁青霄, 候国义, 等. 工艺参数对 CFRP 切削次表面损伤的影响[J].

- 航空制造技术, 2023, 66(20): 118-125.
- [69] I. R, D. S, G. O, et al. Effect of Tool Geometry and LCO₂ Cooling on Cutting Forces and Delamination when Drilling CFRP Composites Using PCD Tools[J]. *Procedia CIRP*, 2022, 108: 752-757.
- [70] 陈良骥, 魏子森. 7075-T651 铝合金铣削参数与刀具几何参数的多目标同步优化方法[J]. *表面技术*, 2022, 51(04): 263-274+383.
- [71] CSONGOR P, NORBERT G, ISTVÁN DP, et al. Drilling fibre reinforced polymer composites (CFRP and GFRP): An analysis of the cutting force of the tilted helical milling process[J]. *Composite Structures*, 2021, 262.
- [72] 马廉洁, 左宇辰, 周云光, 等. 氧化锆陶瓷车削刀具几何参数的多目标优化[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(08): 1129-1134.
- [73] 苏永生, 李亮, 钟相强. 激光选区熔化钛合金超声辅助铣削性能研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(10): 321-327.
- [74] 石文天, 王林, 刘玉德, 等. 微铣削芳纶纤维增强复合材料切削力信号特征试验研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(17): 325-334.
- [75] HOJATI F, DANESHI A, SOLTANI B, et al. Study on machinability of additively manufactured and conventional titanium alloys in micro-milling process[J]. *Precision Engineering*, 2020, 62: 1-9.
- [76] 张俊杰, 刘英想, 胡王杰, 等. TC4 钛合金纵弯超声振动铣削装置及其加工性能研究[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(8): 14-21.
- [77] DENG JX, WU Z, LIAN YS, et al. Performance of carbide tools with textured rake-face filled with solid lubricants in dry cutting processes[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2012, 30(1): 164-172.
- [78] RONADSON BJ, VIJAYAN K, SANMUGAM S, et al. Improving dry machining performance of surface modified cutting tools through combined effect of texture and TiN-WS₂ coating [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 85: 101-108.
- [79] BHRATH H, VENKATESAN K. Study on tool wear mechanism and chip morphology during turning of Inconel 713C by textured inserts[J]. *Journal of*

Manufacturing Processes, 2023, 108: 708-745.

- [80]Sun J, Guo BY. A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(8): 4036-4042.

攻读学位期间取得的成果及参研项目

一、发表论文

- [1] 朱益洋, 苏永生, 王 诚, 等. 增材制造钛合金的刀具织构协同低温铣削性能研究 [J]. 安徽工程大学学报, 2025.(录用)
- [2] Yong-sheng Su, Yi-yang Zhu, Cheng Wang, et al. Investigation on effect of cryogenic cooling on the hole-making of CFRP with conventional PCD tool and textured PCD tool[J]. Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture, 2024. (SCI)
- [3] Yong-sheng Su, Yi-yang Zhu, Hong-wei Li, et al. Investigation on milling of additive manufactured Ti6Al4V by the textured milling tools combined with cryogenic cooling [J]. Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture, 2025. (SCI, 返修再审)

二、参研项目

- [1] 安徽省高等学校科学研究重大项目:增材制造钛合金超声辅助低温切削及低损伤控制机理研究(2022AH040134), 2022.9-2024, 参与.
- [2] 安徽省重点研究与开发计划项目:飞机碳纤维增强树脂基复合材料构件超声制孔关键技术研发及应用(2022a05020006), 2022.1-2024.12, 参与.
- [3] 横向项目:面向航天用零部件的高性能加工关键技术研发(HX-2024-09-006), 2024.5-2027.5, 参与.

致谢

时光荏苒，光阴如梭，转眼间三年的研究生生活即将结束，回顾整个研究生生涯，我深知没有导师、学院、同学、朋友和家人的支持与帮助，我无法顺利地完成课题研究。借此机会，我想对他们表达我最真挚的感谢之情。

首先，衷心感谢我的导师苏永生教授在学术论文写作上对我的悉心指导和无私帮助。从研一开学以来，苏老师一直在教我文献阅读以及笔记记录，对相关文献的结论进行总结与归纳，以及大论文选题、研究思路的确立，到试验开展、论文撰写、修改等各个环节，苏老师始终给予了我细致入微的指导和无微不至的关心。特别是在论文写作过程中，苏老师不辞辛劳地帮助我修改、提升，让我从中学会了如何更严谨、清晰地表述我的研究成果，也培养了我学术研究中持之以恒的毅力和责任心。苏老师在学术上始终保持谦逊、专注，一直言传身教。他那严谨的科研态度深深感染了我，让我在学术道路上收获良多。

同时，非常感谢我的父母、大姑以及堂哥不仅在我学业上给予支持，而且对我以后工作的情况也非常关心，这三年来，感谢他们对我默默无闻的帮助和鼓励使我能够坚持走下来。

此外，感谢安徽工程大学各位老师和同学们，在试验研究过程中，我得到了许多老师和同学的帮助与支持。感谢机械与汽车工程学院和纺织服装学院的老师同学们给予的帮助，感谢材料科学与工程学院的老师同学们给我提供先进的设备仪器，并指导我使用方法，感谢安徽工业大学的老师同学们提供的试验平台，感谢南京工业大学老师同学们提供先进的试验测量设备。在我的研究过程中，没有各位老师同学们给予的丰富的学习资源以及先进的实验设备，为我在科研中获取可靠数据和深入分析提供了宝贵的帮助，我的研究工作将难以顺利开展。

特别感谢我的同门王诚，在论文撰写过程中，我们聚在一起讨论，特别是在讨论数据分析时，理论上普遍的结论与实际试验所得结论有所冲突时，去找寻文献分析原因，分享经验和成果，共同面对困难，推动了彼此的进步，也让我在科研探索中不断成长。

尚德敏学 唯实惟新

